



**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

2022 Том 23 № 1

DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-1

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Научный журнал

Издается с 2000 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Заместитель главного редактора

Резник Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» факультета «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Ответственный секретарь

Агасиева Светлана Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Члены редакционной коллегии

Азравал Бридж – профессор, Военно-морская школа, Монтерей, США

Алифанов Олег Михайлович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Варатараджу Ренугант – профессор, Университет Путра Малайзия, Серданг, Малайзия

Василе Массимилиано Л. – профессор, Университет Стратклайда, Глазго, Великобритания

Вивiani Антонио – профессор, Университет Кампани «Луиджи Ванвители», Неаполь, Италия

Гасбарри Паоло – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Герман Анна – профессор, Университет Бейра Интериор, Ковильян, Португалия

Гитас Иоаннис Зоис – профессор, Университет Аристотеля в Салониках, Салоники, Греция

Грациани Филиппо – почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Гурфил Пини – профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

Дэса Мориба – доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

Дженна Джанкарло – профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

Кавазути Дзюньитиро – профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

Кадугин Владимир Тимофеевич – доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Капустин Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Кузнецов Николай Борисович – профессор, Геологический институт РАН, Москва, Россия

Лишарес Ричард – профессор, Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

Матюшин Максим Михайлович – доктор технических наук, Центр управления полетами АО «ЦНИИмаш» ГК «Роскосмос», Королев, Россия

Медведев Андрей Всеволодович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Мисра Арун – профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

Мортари Даниэле – профессор, Техасский университет A&M, Колледж-Стейшн, США

Мохаммед Сейду О. – профессор, Национальное агентство по космическим исследованиям и развитию, Абуджа, Нигерия

Палмерини Джованни – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Петухов Вячеслав Георгиевич – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Попков Юрий Соломонович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт системного анализа ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

Попов Гарри Алексеевич – академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Москва, Россия

Прадо Антонио – профессор, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия

Редько Иван Яковлевич – доктор технических наук, профессор, АО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского», Москва, Россия

Спенсер В. Дэвид – профессор, Университет штата Пенсильвания, Университи-Парк, США

Фурфаро Роберто – профессор, Университет Аризоны, Тусон, США

Челани Фабио – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Черн Рок Ченг-Шинг – профессор, Университет Райерсона, Торонто, Канада

Ясака Тэцуо – почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Периодичность: 4 выпуска в год (ежеквартально).

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

Цель и тематика

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» – периодическое международное рецензируемое научное издание в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения, геологии, горного и нефтегазового дела. Журнал является международным по составу редакционной коллегии, авторам и тематике публикаций. В журнале публикуются результаты оригинальных научных исследований российских и зарубежных ученых.

Цели журнала:

- содействие развитию российских и зарубежных инженерных школ;
- продвижение и внедрение в практику современных перспективных разработок в указанных областях;
- научный обмен и сотрудничество между учеными.

Журнал входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям: 1.6.10 Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические, технические науки); 1.6.11 Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (геолого-минералогические науки); 1.6.19 Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (геолого-минералогические, технические, физико-математические науки); 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки); 2.3.4 Управление в организационных системах (технические науки); 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки); 2.5.6 Технология машиностроения (технические науки); 2.5.11 Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки); 2.5.12 Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов (технические науки); 2.5.13 Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки); 2.5.14 Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки); 2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки); 2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки).

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде, правила оформления статей и дополнительная информация размещены на сайте <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редколлегия журнала строго придерживается международных стандартов публикационной этики, сформулированных в документе COPE (Committee on Publication Ethics): <http://publicationethics.org>

Редактор *Ю.А. Заикина*
Компьютерная верстка: *Ю.А. Заикина*

Адрес редакции:
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Адрес редакционной коллегии журнала «Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования»:
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engi@rudn.ru

Подписано в печать 03.06.2022. Выход в свет 10.06.2022. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 8,83. Тираж 500 экз. Заказ № 1. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов»
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-08-74; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2022 Volume 23 Number 1

DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-1

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia

Editor-in-Chief

Yury N. Razumny – Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Associate Editor-in-Chief

Sergey V. Reznik – Professor, Head of the Department SM-13 “Composite Materials for Aerospace” of the Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Assistant to the Editor-in-Chief

Svetlana V. Agasieva – Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Editorial Board

Brij Agrawal – Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

Oleg M. Alifanov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Fabio Celani – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Rock Jeng-Shing Chern – Professor, Ryerson University, Toronto, Canada

Roberto Furfaro – Professor, University of Arizona, Tucson, USA

Paolo Gasbarri – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Giancarlo Genta – Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italia

Ioannis Zois Gitas – Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

Filippo Graziani – Full Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Anna Guerman – Professor, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

Pini Gurfil – Full Professor, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

Moriba Jah – Associate Professor, University of Texas at Austin, Austin, USA

Vladimir T. Kalugin – Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Vladimir M. Kapustin – Professor, National University of Oil and Gas “Gubkin University” (Gubkin University), Moscow, Russia

Junichiro Kawaguchi – Professor, Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

Nikolay B. Kuznetsov – Professor, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Richard Linares – Professor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

Maxim M. Matyushin – Dr. (Technical Sciences), JSC “Central Research Institute for Machine Building” (JSC “TsNIMMash”), Korolev, Russia

Andrey V. Medvedev – Dr. (Physical and Mathematical Sciences), corresponding member of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia

Arun Misra – Professor, McGill University, Montreal, Canada

Seidu O. Mohammed – Professor, National Space Research and Development Agency, Abuja, Nigeria

Daniele Mortari – Professor, Texas A&M University, College Station, USA

Giovanni Palmerini – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Vyacheslav G. Petukhov – Dr. (Technical Sciences), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Yury S. Popkov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Harri A. Popov – member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Antonio Prado – Professor, National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil

Ivan Y. Redko – Professor, JSC “Krzhozhanovsky Energy Institute”, Moscow, Russia

David B. Spencer – Professor, Pennsylvania State University, University Park, USA

Renuganth Varatharajoo – Professor, University Putra Malaysia, Seri Kembangan, Malaysia

Massimiliano L. Vasile – Professor, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

Antonio Viviani – Professor, University of Campania Luigi Vanvitelli, Naples, Italy

Tetsuo Yasaka – Professor Emeritus, Kyushu University, Fukuoka, Japan

RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH
Published by the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Publication frequency: quarterly.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access).

Languages: Russian, English.

Indexed by Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

Aims and Scope

The RUDN Journal of Engineering Research – is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of aviation and space technology, mechanical engineering, geology. The journal is international in terms of the composition of the editorial board, authors and topics of publications. The journal publishes the results of original scientific research by Russian and foreign scientists.

The aims of the journal:

- assistance in the development of Russian and foreign engineering schools;
- promotion and implementation into practice of modern advanced technologies in these areas;
- scientific exchange and collaboration between scientists.

The journal is addressed to researchers, engineers, graduate students. Included in the List of the Leading Scientific Journals and Editions of the Highest Certification Committee of the Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral theses are to be published.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> and contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Editorial Board strictly adheres to the international standards of publication ethics of the COPE: <http://publicationethics.org>

Copy Editor *Iu.A. Zaikina*
Layout Designer *Iu.A. Zaikina*

Address of the editorial board:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Research:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-08-74; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Ветрова Н.А., Филяев А.А. Критерий оценки нейросетевой модели гетероструктурных нанoeлектронных устройств для прогнозирования их электрических параметров	7
Морозов Ю.А., Ялунин В.С. Технология инертного анода в концепции зеленой металлургии алюминия	15
Лачуга Ю.Ф., Годжаев З.А., Редько И.Я. Создание и применение мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов	23
Карневич В.В. Построение гидродинамических поверхностей каркасами из кривых Ламе на примере корпуса подводной лодки	30
Ходяков А.А., Хлопков С.В., Басова В.В. Оценка работоспособности бензиновых электромагнитных форсунок по величинам среднего абсолютного отклонения объема тестовой жидкости	38
Корнилова А.В., Чжо Заяр. Устранение причин трещинообразования в ползуне мощного кривошипного штамповочного прессы	47
Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., Герасимова И.Н., Грушева Т.Г. Модифицирование медных сплавов ультрадисперсными порошками	57
Мордвинцев К.П., Корнеева Е.М. Экспериментальные исследования влияния волнения на подводный трубопровод	65

CONTENTS

Vetrova N.A., Filyaev A.A. Evaluation criterion of the neural network model of heterostructural nanoelectronic devices for predicting their electrical parameters	7
Morozov Yu.A., Yalunin V.S. Inert anode technology in the concept of green aluminum metallurgy	15
Lachuga Yu.F., Godzhaev Z.A., Redko I.Ya. Creation and application of mobile multi-functional energy technology complexes	23
Karnevich V.V. Generating hydrodynamic surfaces by families of Lamé curves for modelling submarine hulls	30
Khodyakov A.A., Khlopkov S.V., Basova V.V. Evaluation of the gasoline electromagnetic injectors performance by the average absolute deviation values of the test liquid volume	38
Kornilova A.V., Kyaw Zaya. Elimination of causes of crack formation in the slider of a powerful crank forming press	47
Malkova M.Yu., Zadiranov A.N., Gerasimova I.N., Grusheva T.G. Modification of copper alloys with ultrafine powders	57
Mordvintsev K.P., Korneeva E.M. Experimental studies of the impact of waves' loading on the underwater pipeline	65



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-7-14
УДК 621.382:538.91

Научная статья / Research article

Критерий оценки нейросетевой модели гетероструктурных нанoeлектронных устройств для прогнозирования их электрических параметров

Н.А. Ветрова^{a,b} , А.А. Филяев^{a,c}  

^aМосковский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^cНациональный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Российская Федерация

 alex.filyaev.98@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 22 февраля 2022 г.

Доработана: 15 апреля 2022 г.

Принята к публикации: 29 апреля 2022 г.

Ключевые слова:

нанoeлектроника, критерий,
искусственные нейронные сети,
гетероструктурные устройства

Аннотация. Работа посвящена нейросетевому подходу, который предлагается использовать для прогнозирования эксплуатационных параметров гетероструктурных наноразмерных устройств различного назначения. Его преимуществом является эффективная методика оценки весовых коэффициентов в составе обучаемой искусственной нейронной сети, что позволяет решать задачу для устройств с произвольной структурой. Обучение представляет собой сложный итерационный процесс, по окончании которого важно производить оценку работы нейросетевой модели. Поэтому после построения такой модели необходимо определить достигаемую точность, а также выявить негативные эффекты, которые могут возникнуть в процессе обучения, в частности переобучение и недообучение сети. Представлен критерий оценки качества обучения нейросетевой модели гетероструктурных нанoeлектронных устройств для прогнозирования их электрических параметров. Основное преимущество данного критерия – его чувствительность к негативным эффектам, возникающим в процессе обучения, что было продемонстрировано на примере с двумя входными обучающими параметрами и подтверждено визуальным контролем 3D-поверхностей. Доказана применимость разработанного критерия при выборе нейронных сетей с произвольной архитектурой для решения конструкторских задач при проектировании полупроводниковых приборов.

Для цитирования

Ветрова Н.А., Филяев А.А. Критерий оценки нейросетевой модели гетероструктурных нанoeлектронных устройств для прогнозирования их электрических параметров // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 7–14. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-7-14>



Evaluation criterion of the neural network model of heterostructural nanoelectronic devices for predicting their electrical parameters

Natalia A. Vetrova^{a,b} , Alexandr A. Filyaev^{a,c}  

^aBauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), Moscow, Russian Federation

^bPeoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

^cNational University of Science and Technology "MISIS," Moscow, Russian Federation

 alex.filyaev.98@gmail.com

Article history

Received: February 22, 2022

Revised: April 15, 2022

Accepted: April 29, 2022

Keywords:

nanoelectronics, criterion, artificial neural networks, heterostructural devices

Abstract. The paper is devoted to the neural network approach, which is proposed to be used to predict the operational parameters of heterostructural nanoscale devices. The advantage of this approach is a clear methodology for evaluating the weighting coefficients as part of a trained artificial neural network, which makes it possible to solve the problem for devices with an arbitrary structure. Learning is a complex iterative process, at the end of which it is important to evaluate the functioning of the neural network model. Therefore, it is necessary to determine the achieved accuracy and to identify negative effects that may occur during the learning process, when such a model is being developed. The project presents a criterion for evaluation the training quality of the neural network model of heterostructural nanoelectronic devices for predicting their electrical parameters. The main advantage of this criterion is its sensitivity to negative effects arising in the learning process, which was demonstrated by an example with two input training parameters and confirmed by visual control of 3D surfaces. The applicability of the developed criterion in the selection of neural networks with arbitrary architecture for solving design problems in the development of semi-conductor devices has been proved.

For citation

Vetrova NA, Filyaev AA. Evaluation criterion of the neural network model of heterostructural nanoelectronic devices for predicting their electrical parameters. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):7–14. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-7-14>

Введение

Многообразие перспективных сфер применения ставит перед разработчиками задачу проектирования широкого класса наноразмерных гетероструктурных устройств с различной сложностью низкоразмерного канала в их составе [1–6]. При проектировании гетероструктурных наноприборов очевидна необходимость моделирования их электрических параметров. Применяемые в мировой практике модели носят полуэмпирический характер с рядом допущений и набором поправочных коэффициентов без четкой методики их оценки, что не позволяет решить задачу для произвольной структуры [7–8]. В качестве решения проблемы моделирования электрических параметров разнообразных гетероструктурных устройств предлагается использовать нейросетевой подход [9–10].

Важнейшим этапом при построении модели на основе искусственных нейронных сетей является оценка работы нейронной сети с целью определения достигаемой точности и выявления негативных эффектов недообучения и переобучения нейронной сети [11–13]. При использовании большого числа входных параметров обучения нейросетевой модели проведение такой оценки усложняется, что ставит перед разработчиками задачу формирования универсального критерия выбора нейронной сети.

1. Процесс обучения нейронной сети

Формирование критерия оценки нейронной сети невозможно без однозначного понимания процедуры ее обучения и природы возникновения негативных эффектов при данном процессе. Рассмотрим его подробнее.

Перед началом обучения формируется архитектура нейронной сети, которая методически подбирается для решения конкретной задачи. Затем начинается непосредственно процесс обучения. Существует два подхода к обучению нейронных сетей – неконтролируемый и контролируемый [14].

При неконтролируемом обучении разработчик предоставляет лишь входные данные для обучения, без желаемых выходных параметров. Затем нейросетевая система должна самостоятельно выявить зависимости (процесс самоорганизации), которые она будет в дальнейшем использовать для обработки этого набора данных.

Такая система применяется для анализа и группировки наборов данных в рамках решения трех основных задач: кластеризации, ассоциации и снижения размерности.

Контролируемое обучение подразумевает предоставление разработчиком набора как входных, так и выходных данных для обучения. Далее нейросетевая система обрабатывает векторы входных параметров и сопоставляет их с выходными параметрами, постепенно обновляя весовые коэффициенты и значение смещения. Итерационный процесс контролируемого обучения представлен на рис. 1.

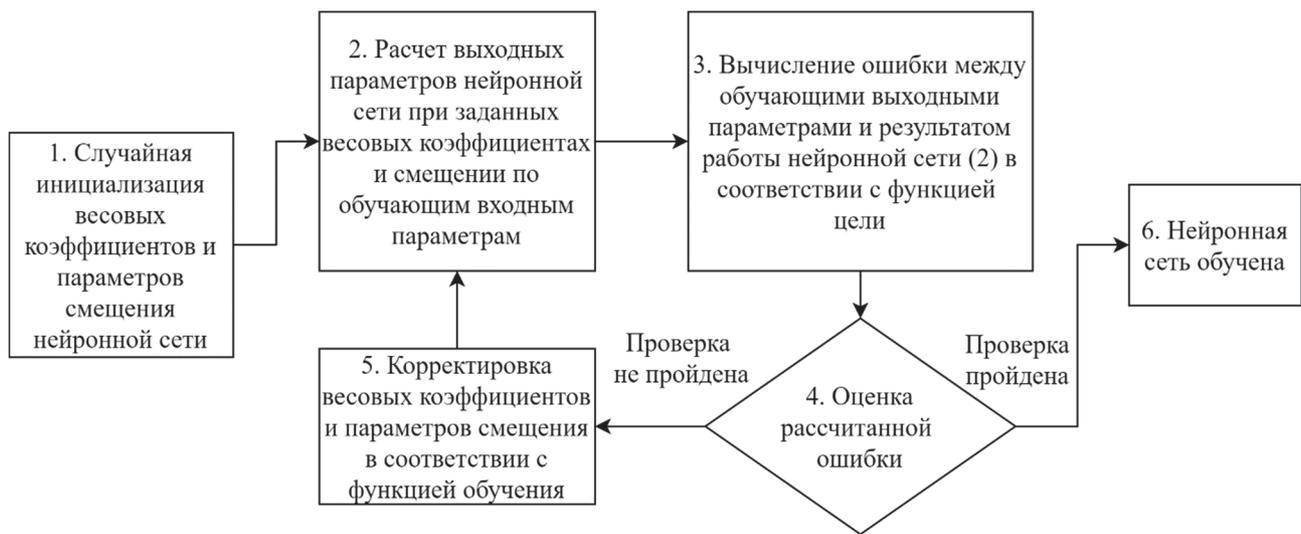


Рис. 1. Итерационный процесс контролируемого обучения нейронной сети

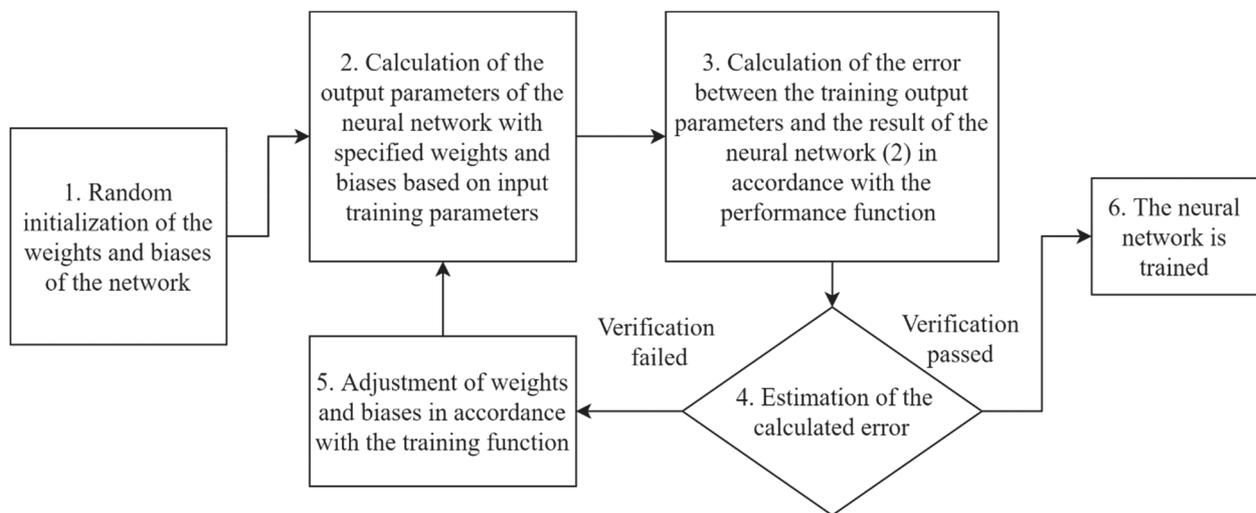


Figure 1. Iterative process of supervised learning of a neural network

Такой подход позволяет решать задачу прогнозирования, что применимо для построения предикторов электрических параметров устройств нанoeлектроники.

В результате неудачного выбора архитектуры нейронной сети (количество скрытых слоев, число нейронов в каждом скрытом слое) можно столкнуться с негативными эффектами, проявляющимися после ее обучения: недообучения и переобучения. При недообучении нейросетевая модель не способна точно отразить взаимосвязь между входными и выходными переменными, что приводит к высокой частоте ошибок между обучающими выходными параметрами и результатом работы нейронной сети. Это происходит, когда модель обладает слишком простой архитектурой. Переобучение представляет собой противоположный эффект, возникающий при использовании излишне усложненной нейросетевой архитектуры. В таком случае модель не приобретает способности к обобщению – возможности распространять обнаруженные на обучающем множестве зависимости и закономерности на новые данные.

2. Критерий оценки нейросетевой модели

Для оценки точности нейронной сети, а также выявления негативных эффектов при ее обучении предлагается введение расчетного параметра σ , который вычисляется как

$$\sigma(X, Y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \cdot 100, \quad (1)$$

где X – массив данных, полученных в результате работы обученной нейронной сети, с элементами x_i в своем составе; Y – массив выходных данных, предназначенных для обучения (контроля) нейронной сети, с элементами y_i в своем составе; n – количество элементов в массивах X , Y .

Для выявления процессов недообучения, исходя из природы данного эффекта, целесообразно проводить сравнение результатов работы нейросетевой модели с обучающими выходными параметрами. В таком случае значение параметра σ более 1 % будет индикатором выявления данного негативного эффекта.

Для выявления процессов переобучения следует заранее сформировать отдельную выборку контрольных выходных значений (например, промежуточные точки относительно обучающей вы-

ходной выборки), так как очевидно, что значение параметра σ относительно обучающей выходной выборки при переобучении примет минимальное значение, а это не позволит выявить данный эффект. В таком случае значение параметра σ относительно контрольной выборки выходных значений более 1 % будет индикатором выявления переобучения нейросетевой модели.

3. Результаты и обсуждение

Для моделирования резонансно-туннельного диода (РТД) в составе умножителя сигнала предложены три нейросетевые модели различной архитектуры (таблица). С применением упрощенной квантово-механической модели (КММ) на основе метода неравновесных функций Грина [15–16] получены обучающие выборки, включающие в себя матрицу входных значений, где в качестве входных параметров выступают ширина потенциальной ямы и величина прикладываемого напряжения, а в качестве выходного параметра выступает рассчитанное значение плотности тока. Диапазон значений входного обучающего вектора напряжения обусловлен интересом к начальному участку вольт-амперной характеристики РТД при дальнейшей интеграции РТД в состав умножителя сигнала. Диапазон значений входного обучающего вектора ширины ямы выбирался для типичных конструкций РТД, шаг обусловлен шириной монослоя. Формирование контрольных входных векторов производилось на промежуточных точках по напряжению и ширине потенциальной ямы.

Для оценки обученных нейросетевых моделей применим критерий, описанный в разделе 2 (рис. 2–3). У нейронной сети № 2 выявлен эффект недообучения ввиду превышающего 1 % значения параметра σ относительно обучающей выходной выборки, что можно наблюдать на поверхности, представленной на рис. 2, б. Действительно, эта нейронная сеть обладает слишком простой архитектурой, что предполагает проявление данного негативного эффекта при обучении.

У нейронной сети № 3, напротив, параметр σ относительно контрольной выходной выборки превышает 1 %, что индицирует процесс переобучения (рис. 3, б), который также подтверждается чрезмерной сложностью архитектуры этой нейросетевой модели для данной регрессионной задачи. Нейронная сеть № 1 обладает приемлемыми (менее 1 %) значениями параметров σ , что говорит о ее успешном обучении (рис. 2, а и 3, а).

Архитектура рассматриваемых нейросетевых моделей

Номер нейронной сети	Число скрытых слоев	Функция активации в каждом скрытом слое	Число нейронов в каждом скрытом слое
1	2	Гиперболический тангенс	[10,5]
2	2	Гиперболический тангенс	[1,3]
3	2	Гиперболический тангенс	[100,25]

Architecture of the considered neural network models

No. of neural network	Number of hidden layers	Activation function in each hidden layer	Number of neurons in each hidden layer
1	2	Hyperbolic tangent	[10,5]
2	2	Hyperbolic tangent	[1,3]
3	2	Hyperbolic tangent	[100,25]

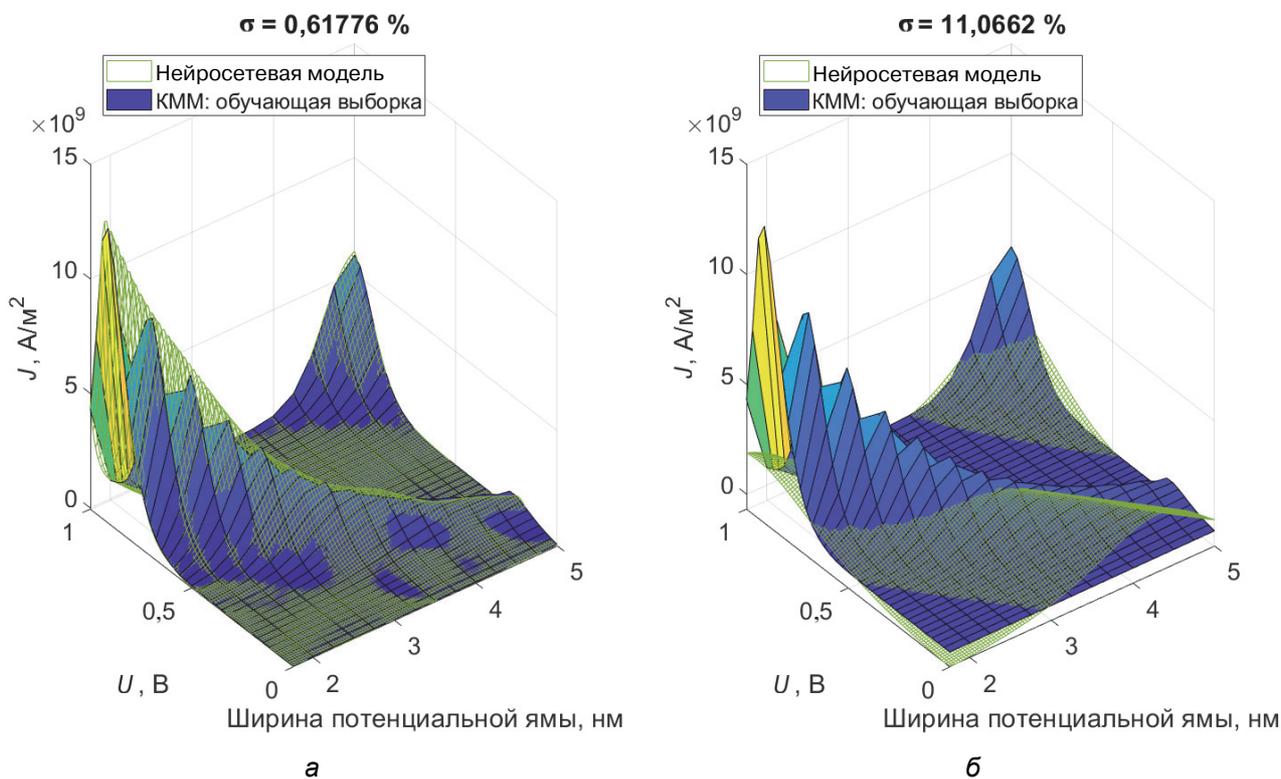


Рис. 2. Выявление эффекта недообучения нейросетевой модели: а – нейронная сеть № 1; б – нейронная сеть № 2

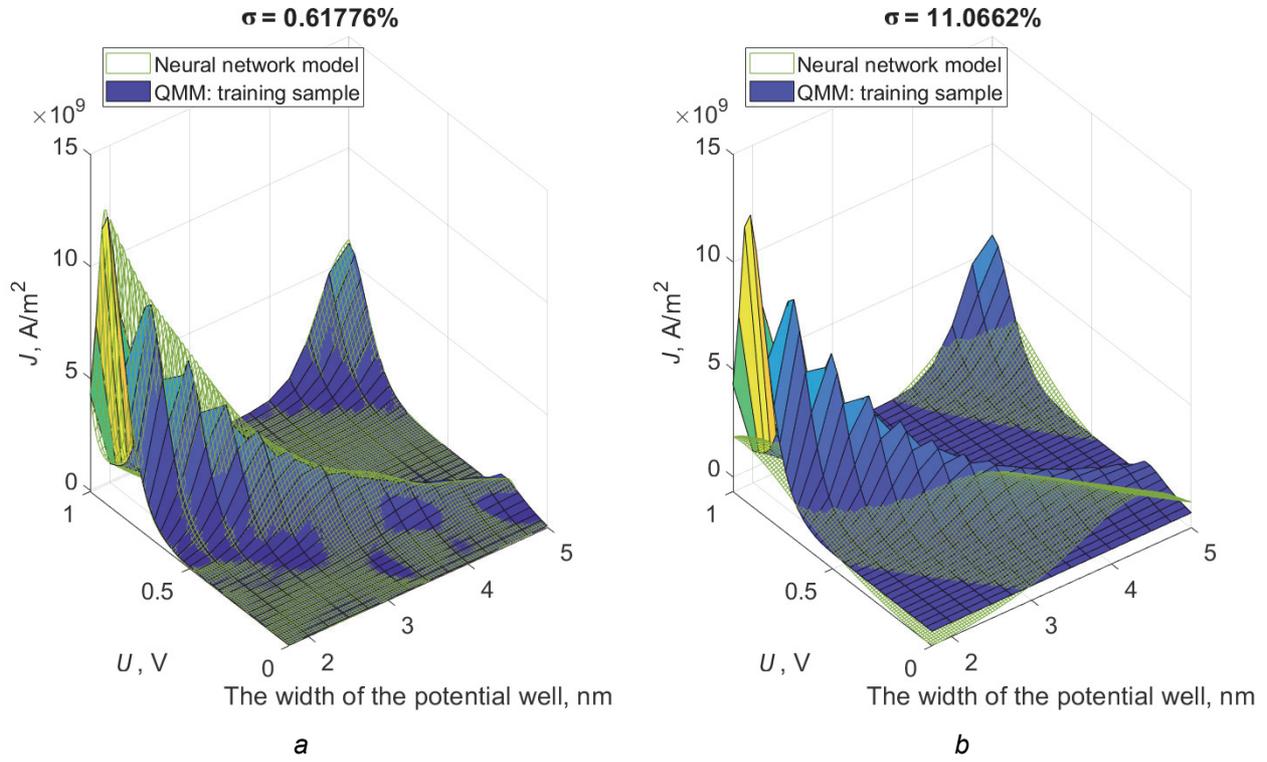


Figure 2. The underfitting detection of the neural network model:
a – neural network No. 1; b – neural network No. 2

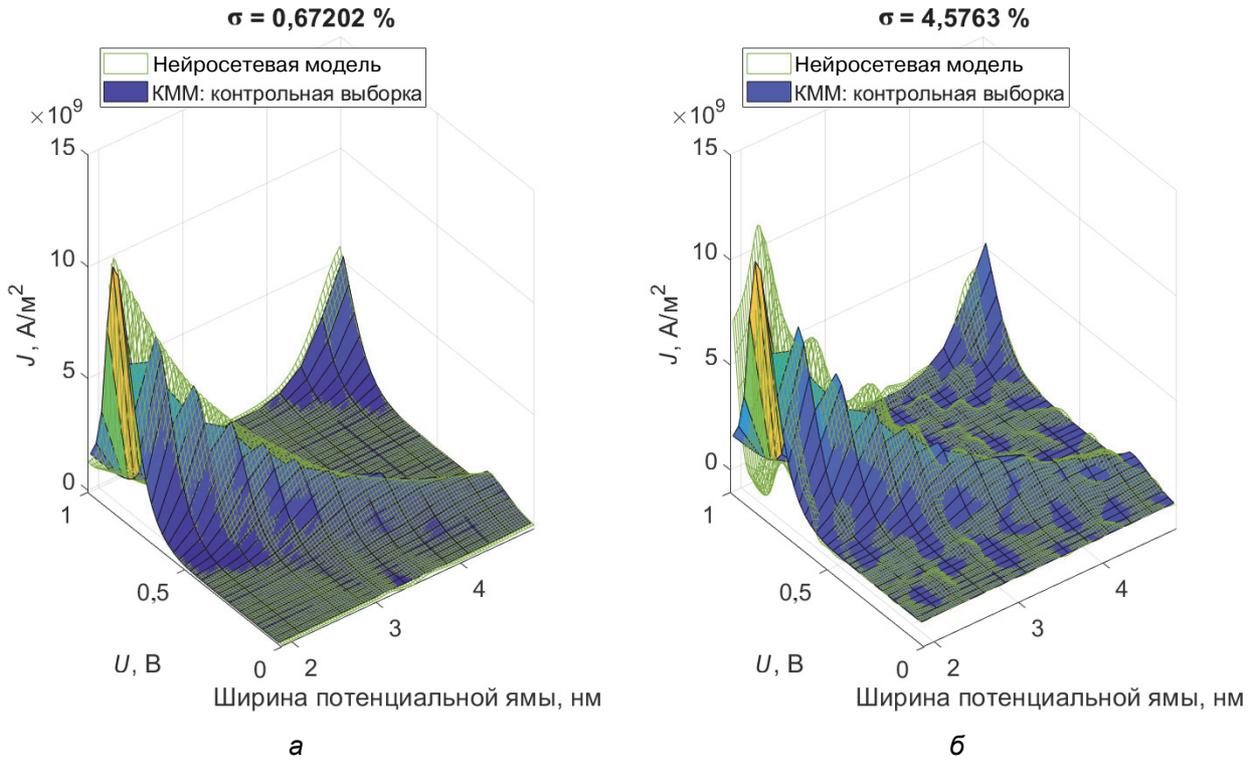


Рис. 3. Выявление эффекта переобучения нейросетевой модели:
а – нейронная сеть № 1; б – нейронная сеть № 3

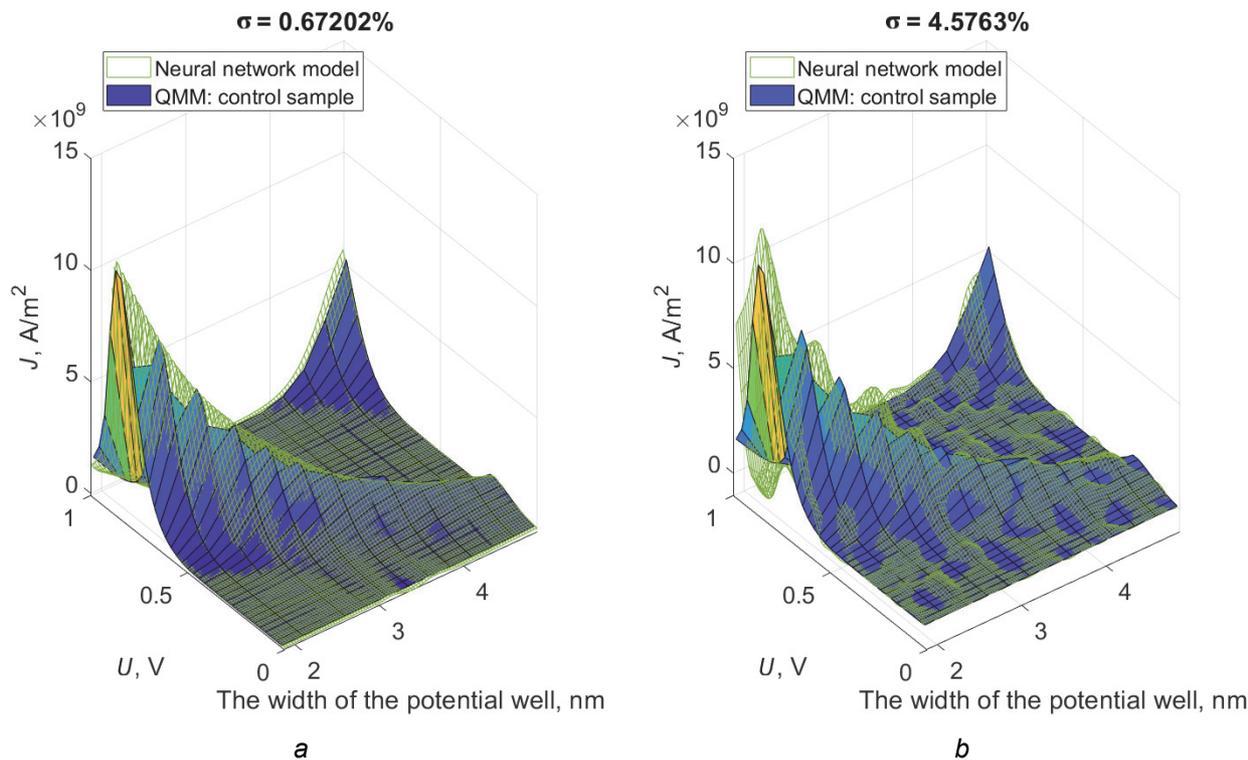


Figure 3. The overfitting detection of the neural network model:
 a – neural network No. 1; b – neural network No. 3

На представленных нейросетевых моделях продемонстрирована корректность работы критерия их оценки, что в рассмотренном примере с двумя входными обучающими параметрами возможно подтвердить визуальным контролем 3D-поверхностей.

Заключение

Разработан критерий оценки качества обучения нейросетевых моделей гетероструктурных нанoeлектронных устройств для прогнозирования их электрических параметров. Данный критерий позволяет не только определить точность таких моделей, но и выявить негативные эффекты, проявляющиеся в процессе их обучения. Проведенный анализ упрощенных нейросетевых моделей, обученных на двух входных параметрах, доказывает применимость критерия для оценки нейронных сетей с более сложной архитектурой, которые позволят решить задачи проектирования полупроводниковых нанoeлектронных устройств произвольной сложности.

Список литературы / References

1. Manh LD, Diebold S, Nishio K, Nishida Y, Kim J, Mukai T, Fujita M, Nagatsuma T. External feedback effect in terahertz resonant tunneling diode oscillators. *IEEE Trans-*

actions on Terahertz Science and Technology. 2018;8(4): 455–464. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2018.2842209>

2. Kasagi K, Suzuki S, Asada M. Large-scale array of resonant-tunneling-diode terahertz oscillators for high output power at 1 THz. *Journal of Applied Physics.* 2019;125(15):151601. <https://doi.org/10.1063/1.5051007>

3. Sattari-Esfahlan SM. Multi-peak negative differential resistance in silicene superlattice: Toward multi-valued silicene logic devices. *Journal of Applied Physics.* 2018;123(24):244503. <https://doi.org/10.1063/1.5032122>

4. Fujita K, Jung S, Jiang Y, Kim JH, Nakanishi A, Ito A, Hitaka M, Edamura T, Belkin MA. Recent progress in terahertz difference-frequency quantum cascade laser sources. *Nanophotonics.* 2018;7(11):1795–1817. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0093>

5. Rakić AD, Taimre T, Bertling K, Lim YL, Dean P, Valavanis A, Indjin D. Sensing and imaging using laser feedback interferometry with quantum cascade lasers. *Applied Physics Reviews.* 2019;6(2):021320. <https://doi.org/10.1063/1.5094674>

6. Bosco L, Franckić M, Scaliari G, Beck M, Wacker A, Faist J. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K. *Applied Physics Letters.* 2019;115(1):010601. <https://doi.org/10.1063/1.5110305>

7. de Oliveira ERC, Pfenning A, Castro EDG, Teodoro MD, dos Santos EC, Lopez-Richard V, Marques GE, Worschech L, Hartmann F, Höfling S. Electroluminescence on-off ratio control of $n-i-n$ GaAs/AlGaAs-based

resonant tunneling structures. *Physical Review B*. 2018; 98(7):075302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.075302>

8. Sawai S, Narahara K. Submillimeter-wave multiphase oscillation using traveling pulses in a resonant-tunneling diode-oscillator lattice. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2021;42(4):426–445. <https://doi.org/10.1007/s10762-021-00780-z>

9. Pchelintsev KP, Vetrova NA, Shashurin VD. Modeling of the degradation of resonant-tunneling diodes using artificial neural networks. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2022;16(1): 82–85. <https://doi.org/10.1134/S102745102201013X>

10. Vetrova NA, Pchelintsev KP, Shashurin VD. An artificial neural network as a predictor of electrical characteristics of nanoelectronic device channel based on a low-dimensional heterostructure. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1695(1):012152. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1695/1/012152>

11. Koehrsen W. *Overfitting vs. underfitting: a complete example*. Toronto: Towards Data Science; 2018.

12. Gavrilov AD, Jordache A, Vasdani M, Deng J. Preventing model overfitting and underfitting in convolutional neural networks. *International Journal of Software Science and Computational Intelligence*. 2018;10(4):19–28. <https://doi.org/10.4018/IJSSCI.2018100102>

13. Narayan S, Tagliarini G. An analysis of underfitting in MLP networks. *2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. 2005;2:984–988. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2005.1555986>

14. Demuth HB, Beale MH, De Jess O, Hagan MT. *Neural network design*. Oklahoma: Martin Hagan; 2014.

15. Anantram MP, Lundstrom MS, Nikonov DE. Modeling of nanoscale devices. *Proceedings of the IEEE*. 2008; 96(9):1511–1550. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.927355>

16. Datta S. *Quantum transport: atom to transistor*. Cambridge University Press; 2005.

Сведения об авторах

Ветрова Наталья Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии приборостроения», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-6218-4111, Scopus Author ID: 57197737296, eLIBRARY SPIN-код: 1555-2871. E-mail: vetrova@bmstu.ru

Филяев Александр Александрович, магистрант, кафедра «Технологии приборостроения», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; инженер научного проекта, лаборатория квантовых коммуникаций, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4. ORCID: 0000-0001-7319-8001, Scopus Author ID: 57218269710, eLIBRARY SPIN-код: 9454-4619. E-mail: alex.filyaev.98@gmail.com

About the authors

Natalia A. Vetrova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Instrument Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), 5 2-ya Bauman-skaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystems Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6218-4111, Scopus Author ID: 57197737296, eLIBRARY SPIN-code: 1555-2871. E-mail: vetrova@bmstu.ru

Alexandr A. Filyaev, master student, Department of Instrument Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation; engineer of the scientific project, National Technology Initiative Center for Quantum Communications, National University of Science and Technology "MISIS," 4 Leninskii Prospekt, Moscow, 119049, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7319-8001, Scopus Author ID: 57218269710, eLIBRARY SPIN-code: 9454-4619. E-mail: alex.filyaev.98@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-15-22
УДК 669.713

Научная статья / Research article

Технология инертного анода в концепции зеленой металлургии алюминия

Ю.А. Морозов^a  , В.С. Ялунин^b 

^aМосковский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

^bМосковский политехнический университет (Московский Политех), Москва, Российская Федерация
 akafest@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 5 января 2022 г.

Доработана: 15 марта 2022 г.

Принята к публикации: 25 марта 2022 г.

Ключевые слова:

алюминий, электролизер, электрометаллургия, углеродный след, анод Содерберга, инертный анод

Аннотация. Анализируется традиционная и перспективная электролитическая технология получения металлического алюминия с точки зрения экологичности производства. Дается краткая характеристика использования электролизеров с анодом Содерберга и предварительно обожженных анодов, объединяемых общим углеродным анодным материалом, окисляемым в газообразный оксид и диоксид углерода при восстановлении алюминия. С целью снижения (исключения) углеродного следа предлагается концепция инертного анода, материал которого не вступает в реакцию восстановления алюминия, а значит, не расходуется (почти), при этом допускается высвобождение кислорода в статусе конечного газообразного «отхода». Базой для разработки принимается электролизер с самообжигающимся анодом Содерберга типа С-8БМ, характеризующий наиболее старую технологию и широко представленный в России. В результате сопоставления условий эксплуатации и технологических возможностей получения анодов подобных размеров из композитных и керамических материалов (керметов) при замещении углеродного анодного массива решено использовать классический медно-никелевый сплав МНМц43-0,5, имеющий минимальное содержание железа (снижающее сортность алюминия) и характеризующийся термической стабильностью при температуре электролиза. На основании электрических характеристик базового процесса и с учетом рекомендаций профильных специалистов «Лаборатории РУСАЛА» устанавливаются размеры металлического инертного анода и даются рекомендации по реконструкции вышеобозначенного электролизера при переходе на новую технологию получения алюминия.

Для цитирования

Морозов Ю.А., Ялунин В.С. Технология инертного анода в концепции зеленой металлургии алюминия // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 15–22.
<http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-15-22>

© Морозов Ю.А., Ялунин В.С., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Inert anode technology in the concept of green aluminum metallurgy

Yury A. Morozov^a , Vladimir S. Yalunin^b 

^aBauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), Moscow, Russian Federation

^bMoscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉ akafest@mail.ru

Article history

Received: January 5, 2022

Revised: March 15, 2022

Accepted: March 25, 2022

Keywords:

aluminum, electrolyzer, electrometallurgy, carbon footprint, Soderberg anode, inert anode

Abstract. An analysis is made of the traditional and advanced electrolytic technology for producing metallic aluminum from the point of view of environmental friendliness of production. A brief description is given of the use of Soderberg anode cells and pre-baked anodes combined by a common carbon anode material oxidized into gaseous oxide and carbon dioxide during aluminum reduction. In order to reduce (eliminate) the carbon footprint, the concept of an inert anode is proposed, the material of which does not enter into the aluminum reduction reaction, and therefore is not consumed (almost), while the release of oxygen in the status of the final gaseous “waste” is allowed. The basis for the development is an electrolytic cell with a self-baking Soderberg anode of the S-8BM type, which characterizes the oldest technology and has a large geography of representation in Russia. As a result of comparing the operating conditions and technological possibilities for obtaining anodes of similar sizes from composite and ceramic materials (cermets) when replacing the carbon anode array, it was decided to use the classic copper-nickel alloy CuNi44Mn1, which has a minimum iron content (reducing the grade of aluminum) and characterized by thermal stability at electrolysis temperature. Based on the electrical characteristics of the basic process and taking into account the recommendations of “RUSAL Laboratory” specialists, the dimensions of the metal inert anode are determined and recommendations are given for the reconstruction of the above-mentioned electrolyzer when switching to a new aluminum production technology.

For citation

Morozov YuA, Yalunin VS. Inert anode technology in the concept of green aluminum metallurgy. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):15–22. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-15-22>

Введение

Алюминий сегодня незаменим ввиду сочетания легкости, прочности и, что немаловажно, стоимости относительно альтернативных металлов (например, магния или титана в авиации). Крупнейшие мировые производители алюминия (около 63 % всего мирового производства) – США, Россия, Канада, Китай, Австралия и Бразилия [1]. В России крупным поставщиком металлического алюминия является объединенная компания «Русский алюминий» (ОК «РУСАЛ»), производящая более 2,42 млн т первичного алюминия и конечной продукции из него. Профильные заводы ОК «РУСАЛ» по большей части расположены на территории Урала (Богословский, Уральский) или Сибири (Богучанский, Братский, Иркутский, Красноярский, Саяногорский, Тайшетский, Хакасский),

что связано с высокой энергоемкостью процесса, требующего мощных и дешевых источников электроэнергии, и обусловлено технологией его электролитического получения.

1. Цель

В настоящее время выявился существенный недостаток классической электролизной технологии, проявившийся с точки зрения экологичности и мирового квотирования карбоновых выбросов (углеродный след). При этом основным токоподводящим элементом является углерод в различном исполнении соответствующего анодного узла.

С начала 30-х гг. XX в. в электрометаллургии начали внедряться непрерывные самообжигающиеся электроды по патенту Содерберга, представляющие собой анодный массив из коксо-

пековой композиции, ограниченной алюминиевой рубашкой, в виде крупных брикетов нефтяного прокаленного кокса (67–69 %), где связующим элементом выступает каменноугольная смола – пек (рис. 1, а) [2; 3].

Несколько модернизированной технологией (в плане удобства) является использование предварительно обожженных угольных блоков, последовательно устанавливаемых в электролизер в требуемом количестве (рис. 1, б).



Рис. 1. Электролизер с анодом Содерберга (а) и предварительно обожженные аноды (б)
Figure 1. Soderberg anode electrolyzer (а) and pre-baked anodes (б)

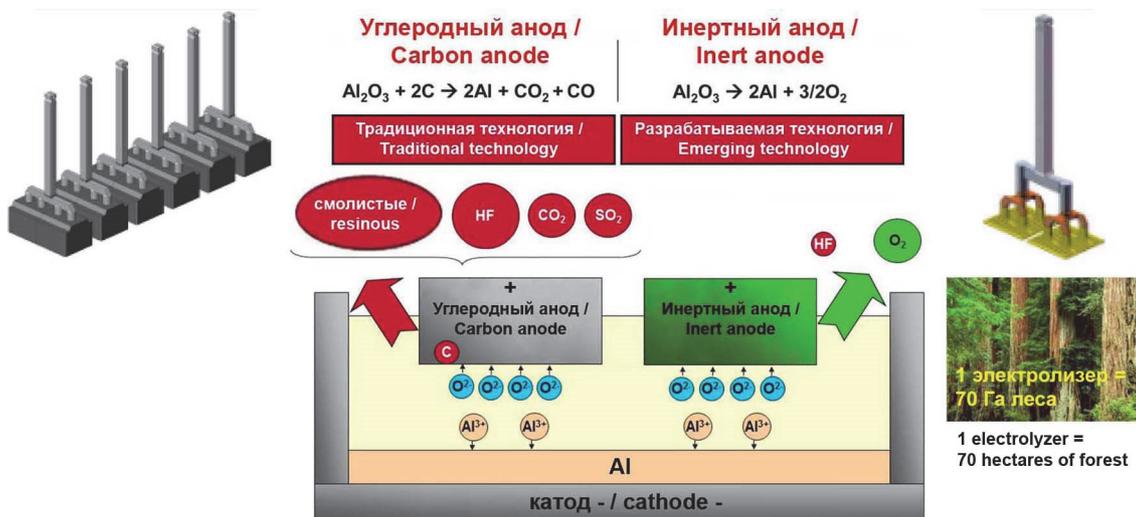
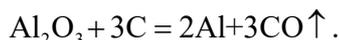


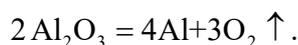
Рис. 2. Сравнение технологий электролиза с углеродным и инертным анодом
Figure 2. Comparison of electrolysis technologies with coal and inert anode

Можно сказать, что все производство алюминия в России основано на реализации этих двух технологий в разных вариациях (имеются попытки внедрения экологичного Содерберга (ЭкоСодерберг) на КрАЗе, ключевым отличием которого является повышенная газоочистка и уменьшение содержания каменноугольной смолы – сухой анод) [4–6].

Использование углерода в качестве токоподводящего анода является экономически выгодным ввиду дешевизны, однако процесс восстановления алюминия приводит к ионообменной реакции соединения углерода с высвобождаемым кислородом и выделению на подошве угольного анода – анодных газов (оксид и диоксид углерода – угарный и углекислый газы), удаляемых в атмосферу



Объем углеродных выбросов можно оценить быстротой расходования углеродных анодов (производство 1 т алюминия требует 500–700 кг анодной массы Содерберга). Конечно, не весь углерод переходит в газообразное состояние, частично происходит его осыпание с науглероживанием электролита, но объемы выбросов все равно впечатляют. Не принимая в расчет выбросы углекислого газа при выработке электроэнергии, на восстановление тонны алюминия выделяется до 11 т CO + CO₂. Поэтому актуально создание *инертного анода*, материал которого не вступает в ионообменную реакцию восстановления алюминия, а значит, почти не расходуется, при этом допускается высвобождение кислорода в статусе конечного газообразного «отхода», эквивалентного 0,9 т кислорода O₂ на 1 т алюминия (одна ванна может производить кислород эквивалентно 70 Га леса), рис. 2 [7–15].



Исследования данного направления ведутся с 80-х гг. XX в., но в силу специфичности требований и условий эксплуатации до сих пор нет какого-либо широкого применения подобной экологичной технологии. Значительный разогрев ванны требует термической стабильности до 1000 °С, должны обеспечиваться нерастворимость, достаточно высокая механическая прочность, малая стоимость и легкость в изготовлении и пр. Важным условием является недопустимость содержания железа в составе анода, так как понижается сортность алюминия.

2. Материалы и методы

В рамках проектной работы, организованной лабораторией РУСАЛа, была предложена концепция зеленого анода на базе электролизера с самообжигающимся анодом Содерберга типа С-8БМ.

Данный выбор обусловлен тем, что подобные электролизеры характеризуют наиболее старую технологию, значительно распространены в России и их модернизация путем замещения углеродного анодного массива инертным анодом эко-

номически целесообразней в сравнении с разработкой нового поколения оборудования.

При замещении углеродного анодного массива решено использовать классические литейные металлические сплавы с проведением аналитического исследования электрических характеристик материалов в условиях, приближенных к электролизному производству.

Исследование показало большую неоднозначность электрического сопротивления, определяемого совокупностью используемых марок угля, объемной доли их смешивания, степени готовности и крупности, так как образовавшийся из угля полукокс начинает существенно менять свое электросопротивление (проводить электрический ток) при прямом влиянии температуры (рис. 3) [16].

Выбор металлического анода в первую очередь определяется его заранее запланированными свойствами. Так, с точки зрения жаростойкости используется никель, а основным материалом электротехнических изделий является медь, образующие твердофазные растворы неограниченной растворимости (рис. 4).

Рассматривая стандартные медно-никелевые сплавы, можно рекомендовать к использованию сплав МНМц43-0,5, имеющий минимальное содержание железа (до 0,15 %) и характеризующийся термической стабильностью при температуре плавления ~ 1290 °С, что будет достаточным в условиях электролиза ~ 950 °С¹.

Основным условием ОК «РУСАЛ» является ограничение снижения силы тока – не ниже 140 кА! Иными словами, электрические характеристики проектного металлического анода численно должны соответствовать базовому углеродному аноду.

При рабочем токе $I = 185$ кА наиболее распространенного на заводах России электролизера Содерберга с анодом типа С-8БМ согласно закону Ома рассчитывается электросопротивление в заданном интервале силы тока с учетом расчетного падения напряжения на аноде $\Delta U_a = 593$ мВ (рис. 5)

$$R_a^m \equiv R_a^{\text{угл}} = \frac{\Delta U_a}{I} = \frac{593 \times 10^{-3}}{(140 - 185) 10^3} \approx \\ \approx (4,236 - 3,205) 10^{-6} \text{ Ом.}$$

¹ Медно-никелевый сплав // Марочник стали и сплавов. URL: http://splav-kharkov.com/choose_mat.php?class_id=61 (дата обращения: 20.04.2022).

Проделанные электрические расчеты базируются на габаритных размерах металлического анода, и с учетом его большей в 100 крат электропроводности для исключения короткого замыкания на малом электросопротивлении электролита (криолитоглиноземный расплав) в цепь анодных стержней включаются дополнительные резистивные элементы, устанавливающие электрический баланс относительно базового углеродного анодного массива.

При разработке концепции инертного анода принято его горизонтальное положение из соображений максимальной поверхности контакта с электролитом.

Сам анод принимается наборным, состоящим из четырех пластин, заполняющих существующую площадь металлической анодной рубашки электролизера Содерберга, которую в свою очередь допускается демонтировать, так как с ис-

ключением углеродного анода она утрачивает свою функцию формирования анодной массы из коксо-пековой композиции.

Вместо нее на ванне устанавливается балка-коллектор электромеханического привода вертикального перемещения опорных стержней токовода каждой анодной пластины по четырехточечной схеме для исключения поперечных перекосов (рис. 6).

Ввиду работы металлического анода в условиях значительной температуры электролиза предусматривается его охлаждение, которое можно реализовать по двум схемам.

В первом случае осуществляется принудительное водяное охлаждение трубчатыми холодильниками, напаянными на внешнюю поверхность, с подачей охлаждающей жидкости гибкой подводкой со стороны балки-коллектора.

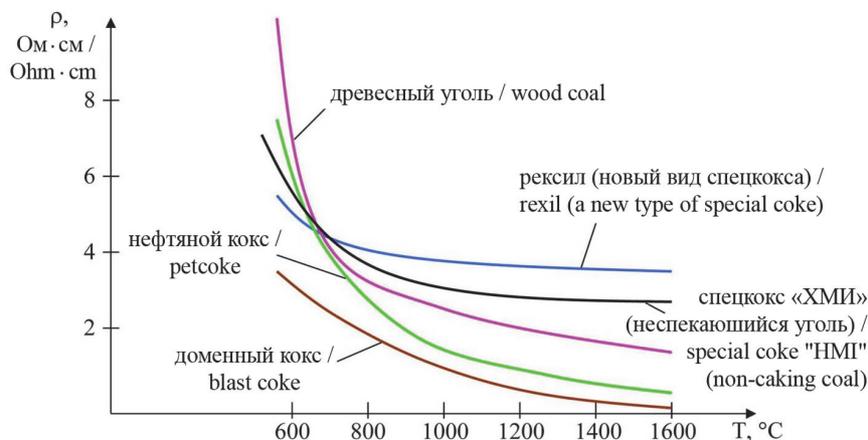


Рис. 3. Зависимость электросопротивления углей от температуры [17]
Figure 3. The dependence of the electrical resistance of coals on temperature

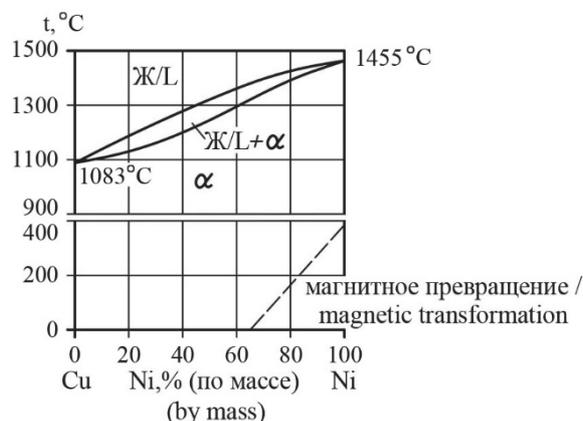


Рис. 4. Диаграмма состояния системы «медь – никель» (Cu-Ni)
Figure 4. Diagram of the state of the system “copper – nickel” (Cu-Ni)

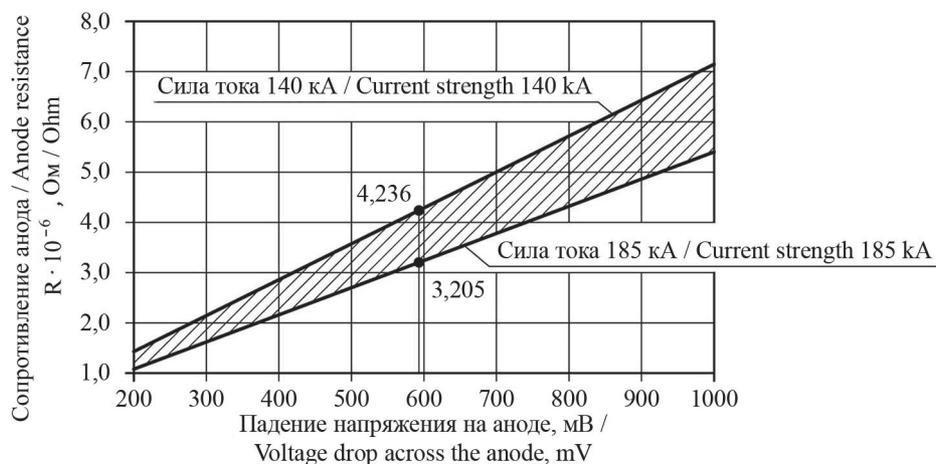


Рис. 5. Допустимый разброс сопротивления проектного металлического анода
Figure 5. Permissible spread of resistance of the design metal anode

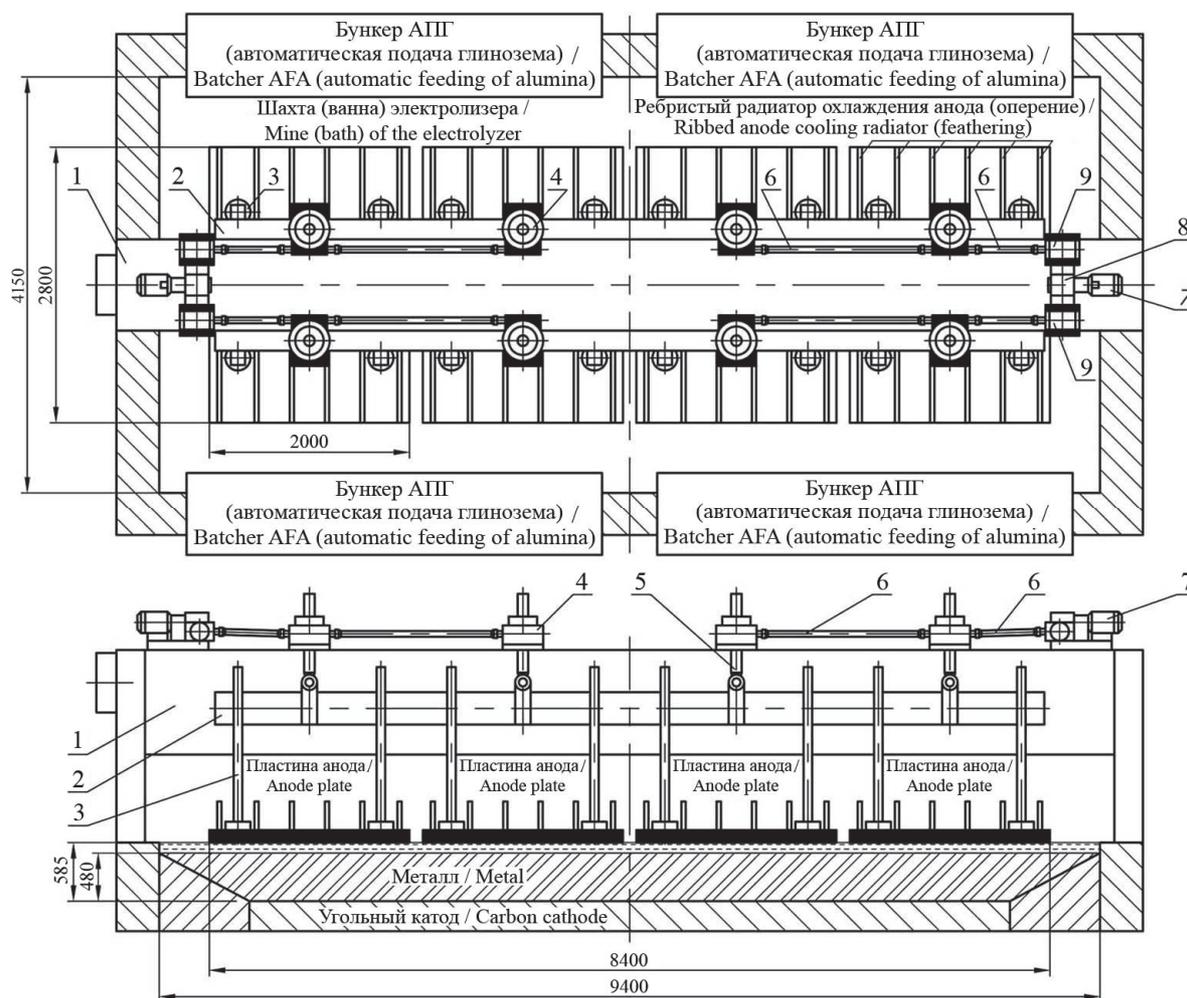


Рис. 6. Концепция металлического инертного анода (размещение электропривода по торцам коллектора):

1 – балка-коллектор; 2 – анодная ошиновка; 3 – аноды; 4 – винтовые домкраты;
 5 – винт домкрата; 6 – карданный вал; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор червячный; 9 – редуктор конический

Figure 6. The concept of a metal inert anode (placement of the electric drive at the ends of the collector):

1 – beam-collector; 2 – anode busbar; 3 – anodes; 4 – screw jacks;
 5 – screw of the jack; 6 – cardan shaft; 7 – electric motor; 8 – worm gearbox; 9 – bevel gearbox

Вторым вариантом может быть пассивное охлаждение ребристыми радиаторами, напаянными на внешнюю поверхность анодной пластины, что является более предпочтительным по причине сложности организации принудительного водяного охлаждения, а также вероятности аварийных ситуаций при попадании охлаждающей жидкости (вода, эмульсия) в нагретый электролит.

3. Результаты

Разработанная с учетом рекомендаций профильных специалистов «Лаборатории РУСАЛА» (2021) концепция металлического инертного анода допускает минимальные затраты при переходе к более прогрессивной технологии получения алюминия на базе имеющихся электролизеров Содерберга, модернизируемых путем замещения углеродного анодного массива наборными горизонтальными медно-никелевыми пластинами из сплава МНМц43-0,5 аналогичных размеров.

Заключение

Предложенный материал и концепция инертного анода соответствуют требуемым температурным и электрическим параметрам исследуемого процесса. Монометаллический медно-никелевый сплав МНМц43-0,5 имеет достаточную термическую стабильность в условиях электролиза алюминия (950 °С), а минимальное содержание железа в сплаве (до 0,15 %) позволяет производить металлический алюминий высокой сортности, то есть высокой конкурентноспособности. Кроме того, использование классических литейных металлических сплавов облегчает технологию формообразования пластины анода с применением процессов обработки давлением, например прокатка плиты требуемой ширины и толщины.

Список литературы

1. Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинов Г.А. Электрометаллургия алюминия. Новосибирск: Наука, 2001. 176 с.
2. Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А., Галевский Г.В. Электролизеры с анодом Содерберга и возможности их модернизации // Цветные металлы. 2010. № 12. С. 49–52.
3. Бегунов А.И., Бегунов А.А. Модернизация электролизных производств с использованием анодов Содерберга // Цветные металлы. 2011. № 7. С. 45–49.
4. Виноградов А.М., Пинаев А.А., Виноградов Д.А., Пузин А.В., Шадрин В.Г., Зорько Н.В., Сомов В.В. Повышение эффективности укрытия электролизеров Содер-

берга // Известия вузов. Цветная металлургия. 2017. № 1. С. 19–30. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>

5. Buzunov V., Mann V., Chichuk E., Pitercev N., Cherskikh I., Frizorger V. Vertical stud Soderberg technology development by UC Rusal in 2004–2010 (Part 1) // Light Metals. 2012. Pp. 743–748. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_128

6. Frizorger V., Mann V., Chuchuk E., Buzunov V., Marakushina E., Pitercev N., Cherskikh I., Gildebrandt E. Vertical stud Soderberg technology development by UC Rusal in 2004–2010 (Part 2. EcoSoderberg Technology) // Light Metals. 2012. Pp. 749–753. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_129

7. Xianxi W. Aluminum electrolytic inert anode // Inert Anodes for Aluminum Electrolysis. 2021. Pp. 23–120. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28913-3_3

8. Падамата С.К., Ясинский А.С., Поляков П.В. Инертные аноды в алюминийевой промышленности: обзор // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2018. № 11 (1). С. 18–30. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0055>

9. Du J., Wang B., Liu Y., Yao G.C., Fang Zh., Hu P. Study on the bubble behaviour and anodic overvoltage of NiFe₂O₄ ceramic based inert anode // Light Metals. 2015. Pp. 1193–1197. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_200

10. Weiping P., Ying L., Jie G., Ruilong Z., Jianhong Y., Wangxing L. Effect of La on the electrolysis performance of 46Cu-25Ni-19Fe-10Al metal anode // Light Metals. 2014. Pp. 1301–1304. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_217

11. Wang Z., Xue J., Feng L., Dai F. Investigating the corrosion behaviors of Fe-Ni-Cr anode material for aluminum electrolysis // Light Metals. 2014. Pp. 1315–1319. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_220

12. He H. The metal phase selection of 10NiO-NiFe₂O₄-based cermet anodes for aluminium electrolysis // Light Metals. 2014. Pp. 1321–1325. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_221

13. Liu J.-Y., Li Zh.-Y., Tao Y.-Q., Zhang D., Zhou K.-Ch. Phase evolution of 17(Cu-10Ni)-(NiFe₂O₄-10NiO) cermet inert anode during aluminum electrolysis // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. Vol. 21. No 3. Pp. 566–572. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60752-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60752-8)

14. Lu J., Xia Z. The corrosion performance of a binary Cu-Ni alloy used as an anode for aluminum electrolysis // Applied Mechanics and Materials. 2011. Vol. 55–57. Pp. 7–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.55-57.7>

15. Glucina M., Hyland M. Laboratory scale testing of aluminium bronze as an inert anode for aluminium electrolysis // Light Metals. 2005. Pp. 523–528.

16. Саранчук В.И., Ошовский В.В., Лавренко А.Т., Кошкарев Я.М. Метод определения величины электрического сопротивления угля в зависимости от температуры // Научные труды Донецкого национального

технического университета. Серия: Химия и химическая технология. Донецк: ДонНТУ, 2008. С. 138–143.

17. Ульева Г.А. Исследование физико-химических свойств специальных видов кокса и его применение для выплавки высококремнистых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2013. 23 с.

References

1. Mincis MYa, Polyakov PV, Sirazutdinov GA. *Aluminum electrometallurgy*. Novosibirsk: Nauka Publ., 2001. (In Russ.)

2. Mincis MYa, Sirazutdinov GA, Galevskij GV. Electrolyzers with Soderberg anode and possibilities of their modernization. *Tsvetnye Metally*. 2010;(12):49–52. (In Russ.)

3. Begunov AI, Begunov AA. Modernization of electrolysis production with Soderberg anodes. *Tsvetnye Metally*. 2011;(7):45–49. (In Russ.)

4. Vinogradov AM, Pinaev AA, Vinogradov DA, Puzin AV, Shadrin VG, Zorko NV, Somov VV. Improving the efficiency of sheltering soderberg electrolyzers. *Izvestiya Non-Ferrous Metallurgy*. 2017;(1):19–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-19-30>

5. Buzunov V, Mann V, Chichuk E, Pitercev N, Cherskikh I, Frizorger V. Vertical stud Soderberg technology development by UC Rusal in 2004–2010 (Part 1). *Light Metals*. 2012:743–748. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_128

6. Frizorger V, Mann V, Chuchuk E, Buzunov V, Marakushina E, Pitercev N, Cherskikh I, Gildebrandt E. Vertical stud Soderberg technology development by UC Rusal in 2004–2010 (Part 2. EcoSoderberg Technology). *Light Metals*. 2012:749–753. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48179-1_129

7. Xianxi W. Aluminum electrolytic inert anode. *Inert Anodes for Aluminum Electrolysis*. 2021:23–120. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28913-3_3

8. Padamata SK, Yasinskiy AS, Polyakov PV. Progress of inert anodes in aluminium industry: review. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2018;11(1):18–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0055>

9. Du J, Wang B, Liu Y, Yao GC, Fang Zh, Hu P. Study on the bubble behaviour and anodic overvoltage of NiFe₂O₄ ceramic based inert anode. *Light Metals*. 2015: 1193–1197. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48248-4_200

10. Weiping P, Ying L, Jie G, Ruilong Z, Jianhong Y, Wangxing L. Effect of La on the electrolysis performance of 46Cu-25Ni-19Fe-10Al metal anode. *Light Metals*. 2014: 1301–1304. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_217

11. Wang Z, Xue J, Feng L, Dai F. Investigating the corrosion behaviors of Fe-Ni-Cr anode material for aluminum electrolysis. *Light Metals*. 2014:1315–1319. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_220

12. He H. The metal phase selection of 10NiO-NiFe₂O₄-based cermet anodes for aluminium electrolysis. *Light Metals*. 2014:1321–1325. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_221

13. Liu J-Y, Li Zh-Y, Tao Y-Q, Zhang D, Zhou K-Ch. Phase evolution of 17(Cu-10Ni)-(NiFe₂O₄-10NiO) cermet inert anode during aluminium electrolysis. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21(3):566–572. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60752-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60752-8)

14. Lu J, Xia Z. The corrosion performance of a binary Cu-Ni alloy used as an anode for aluminum electrolysis. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;55–57:7–10. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.55-57.7>

15. Glucina M, Hyland M. Laboratory scale testing of aluminium bronze as an inert anode for aluminium electrolysis. *Light Metals*. 2005:523–528.

16. Saranchuk VI, Oshovskij VV, Lavrenko AT, Koshkarev YaM. Method for determining the magnitude of the electrical resistance of coal depending on temperature. *Scientific Works of the Donetsk National Technical University. Series: Chemistry and Chemical Technology*. Donetsk: Donetsk National Technical University; 2008. p. 138–143. (In Russ.)

17. Uleva GA. *Study of the physicochemical properties of special types of coke and its application for the smelting of high-silicon alloys* (Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences). Ekaterinburg; 2013. (In Russ.)

Сведения об авторах

Морозов Юрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-13 «Технологии обработки материалов», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. ORCID: 0000-0001-9229-7398, Scopus Author ID: 24475032700, eLIBRARY SPIN-код: 3189-5426. E-mail: akafest@mail.ru

Ялунин Владимир Сергеевич, магистрант, кафедра «Металлургия», Московский политехнический университет (Московский Политех), Российская Федерация, 111250, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38. ORCID: 0000-0002-1994-7531. E-mail: molnir9@yandex.ru

About the authors

Yury A. Morozov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department MT-13 “Materials Processing Technologies,” Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9229-7398, Scopus Author ID: 24475032700, eLIBRARY SPIN-code: 3189-5426. E-mail: akafest@mail.ru

Vladimir S. Yalunin, master’s student, Department “Metallurgy,” Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semenovskaya St, Moscow, 111250, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-1994-7531. E-mail: molnir9@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-23-29
УДК 631.171

Научная статья / Research article

Создание и применение мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов

Ю.Ф. Лачуга^а, З.А. Годжаев^б, И.Я. Редько^с✉

^аОтделение сельскохозяйственных наук РАН, Москва, Российская Федерация

^бФедеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

^сЮжно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация

✉ redko_iya@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 28 ноября 2021 г.

Доработана: 15 января 2022 г.

Принята к публикации: 25 января 2022 г.

Ключевые слова:

многофункциональные энерготехнологические комплексы, энергоэффективность, концепции развития, инновационные технологии, агропромышленный комплекс, многофункциональность, тягово-энергетическая концепция

Аннотация. В настоящее время в мире идут процессы трансформации энергетических систем, в результате которых создается их новая архитектура. Основными факторами, обуславливающими трансформацию энергетических систем, являются значительное уменьшение стоимости генерации энергии и увеличение потребления электроэнергии, включая распределенную генерацию, электротранспорт, электрификацию мобильных энергосредств в агропромышленном комплексе, систему управления накоплением энергией, энергообеспечения и интеллектуализации производства. Факторами развития энерготехнологических комплексов выступают также возможности создания экологически чистых ферм на возобновляемых источниках энергии в районах с труднодоступной логистикой энергетических ресурсов, таких как бензин и дизельное топливо. Уменьшение выбросов CO₂ в атмосферу и улучшение экологии отнюдь не единственный фундаментальный результат развития энерготехнологических комплексов. Проанализированы основные принципы создания мобильных энергетических комплексов. Многокритериальная постановка задачи для оценки эффективности позволяет выявить наиболее подходящие критерии качества и функциональные ограничения.

Для цитирования

Лачуга Ю.Ф., Годжаев З.А., Редько И.Я. Создание и применение мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 23–29. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-23-29>



Creation and application of mobile multifunctional energy technology complexes

Yury F. Lachuga^a, Zakhid A. Godzhaev^b , Ivan Ya. Redko^c  

^aDepartment of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^bFederal Scientific Agroengineering Center, All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization, Moscow, Russian Federation

^cSouth Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

 redko_iya@mail.ru

Article history

Received: November 28, 2021

Revised: January 15, 2022

Accepted: January 25, 2022

Keywords:

multifunctional energy technology complexes, energy efficiency, development concepts, innovative technologies, agriculture, multifunctionality, traction and energy concept

Abstract. Currently, there are processes of transformation of energy systems in the world, as a result of which a new architecture is being created. The main factors driving the transformation of energy systems are a significant reduction in the cost of energy generation and an increase in electricity consumption, including distributed generation, electric transport, electrification of mobile energy facilities in the agro-industrial complex, energy storage management system, energy supply and intellectualization of production. Factors in the development of energy technology complexes are also the possibility of creating environmentally friendly farms using renewable energy sources in areas with difficult-to-access logistics of energy resources, such as gasoline and diesel fuel. Reducing emissions of CO₂ into the atmosphere and improving the environment is by no means the only fundamental result of the development of energy technology complexes. This paper reviews the basic principles of creating mobile energy complexes, based on the analysis. Multi-criteria formulation of the task for evaluating the effectiveness, allows you to identify the most appropriate quality criteria and functional limitations.

For citation

Lachuga YuF, Godzhaev ZA, Redko IYa. Creation and application of mobile multifunctional energy technology complexes. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):23–29. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-23-29>

Введение

В настоящее время наиболее активно развиваются инновационные технологии в области электроэнергетики и электрификации мобильных процессов в отраслях, в том числе в агропромышленном комплексе (АПК) [1–3]:

- на базе солнечных аэрокосмических энергетических комплексов со сверхвысокой частотой (СВЧ) и лазерными магистралями передачи энергии, которые могут обеспечить энергетическую безопасность и надежное энергоснабжение на отдаленных и труднодоступных территориях Сибири, Севера и Дальнего Востока, не охваченных централизованным энергоснабжением;

- на базе многофункциональных энерготехнологических комплексов (МЭК) гибридной генерации, которые являются основой автономных систем энергоснабжения и используют все многообразие местных энергетических ресурсов;

- на базе мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов, на основе ин-

новационных тягово-энергетической и энергетической концепций развития мобильной техники, которые позволят принципиально новым способом получить энергию и продукты питания, в том числе с использованием фитотронных технологий.

МЭК гибридной генерации и мобильные комплексы являются наиболее мощными потребителями энергоресурсов в отраслях ТЭК и АПК соответственно. Однако их энергетическая и экологическая эффективность использования энергоресурсов недостаточно изучена. Поскольку МЭК гибридной генерации, мобильные и аэрокосмические направлены на производство электроэнергии, тепла и сельскохозяйственной продукции, их энергетические и технологические схемы могут быть описаны на основе таких аналитических зависимостей, которые позволят разработать математическую модель обобщенного МЭК. Эта модель в зависимости от внешних условий будет определять тип МЭК: мобильный, гибридной генерации или аэрокосмический. В данном исследова-

нии рассмотрим тягово-энергетическую концепцию создания мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов и разработку общих технических требований к мобильным МЭК.

1. Анализ и выявление первичных требований к мобильным комплексам

Анализ существующих конструктивно-компоновочных схем мобильных технологических агрегатов (МТА) показал, что они практически исчерпали возможности дальнейшего существенного повышения технико-экономических показателей. Поэтому повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов МТА путем улучшения использования структуры и совершенствования производственного оборудования становится все более затруднительным. Действительно, основой структуры производственного оборудования МТА в настоящее время является двигатель внутреннего сгорания (ДВС). Следовательно, показатели работы МТА в значительной мере будут зависеть, прежде всего, от эффективности этого звена (модуля). Если проанализировать основные направления совершенствования ДВС: повышение надежности, улучшение экологических показателей и топливной экономичности, снижение эксплуатационных расходов, увеличение удельной мощности, расширение многотопливных свойств и применения электроники, то можно заключить, что возможности его совершенствования уже исчерпаны. Поэтому решение проблем в отраслях АПК надо переносить с традиционной компоновки мобильного агрегата с тяговым принципом передачи энергии к рабочим машинам (технологическим модулям) на тягово-энергетическую концепцию создания таких агрегатов (комплексов). В самом общем виде этой концепции соответствует мобильный многофункциональный энерготехнологический комплекс, использующий все многообразие местных энергетических ресурсов, направленных на удовлетворение нужд населения и производства в электрической энергии, тепле и различных видах моторных топлив. К наиболее высокому уровню развития таких систем можно отнести многофункциональный энерготехнологический комплекс модульного типа. Под многофункциональностью следует понимать возможность такого мобильного МЭК работать на местных топливно-энергетических ресурсах, в том числе на генераторном газе и биотопливах, и выраба-

тывать различные виды энергии. Ветер, гидроэнергетика и солнечная энергия являются источниками «чистой» электроэнергии, которая впоследствии может храниться в различных формах для кратковременного и длительного использования. Биомасса, солнечная энергия и ветер – широкодоступные альтернативные возобновляемые источники энергии (ВИЭ), которые получают с использованием современных источников энергии. Биодизель, биоэтанол, биометан – энергетические ресурсы, произведенные из экологически чистого и многообещающего источника энергии – биомассы.

МЭК представляет собой систему, состоящую из отдельных модулей, конструктивно и функционально совместимых между собой. Комбинации различных функционально и конструктивно согласуемых модулей позволяют получать различные по составу и мощности мобильные комплексы в зависимости от размеров поля и требуемой производительности. Такая концепция развития мобильных средств позволяет гибко изменять конструктивно-компоновочные решения МЭК в зависимости от внешних условий его эксплуатации.

Этот комплекс (система) может состоять из следующих звеньев: «местные энергетические ресурсы – модуль для производства моторного топлива – многотопливный ДВС – элементы системы генерации электроэнергии и тепла – тип трансмиссии – преобразователь частоты – накопитель энергии – многоканальная передача электрической и тепловой энергии – потребитель энергии различной физической природы».

Анализ общих конструктивно-компоновочных решений и классификация мобильных МЭК указывают на их огромное разнообразие. Однако преимущественное распространение получили мобильные комплексы на базе ДВС, работающих на дизельном топливе.

2. Основные направления развития МЭК

Для достижения высокого качества и надежности функционирования мобильных МЭК необходимо решить проблемы, связанные, прежде всего, с производительностью, многофункциональностью, энергонасыщенностью, металлоемкостью, многотопливностью, экологической безопасностью, снижением эксплуатационных расходов, оптимизацией выбора состава оборудования на стадии проектирования мобильной техники, совершенствованием

режимов работы и конструктивно-компоновочных решений мобильной техники по критериям энергетической, функциональной и экономической эффективности.

Поэтому важнейшими направлениями развития мобильных средств являются:

1) совершенствование технологии производства различных видов моторных топлив, электрической и тепловой энергии;

2) расширение многотопливных свойств ДВС в составе МЭК;

3) улучшение использования структуры мобильного парка в отраслях АПК;

4) совершенствование отдельных модулей (звеньев) МЭК;

5) оптимизация параметров и режимов работы мобильных комплексов;

6) оптимизация распределения мощностных потоков между потребителями МЭК.

Новая тягово-энергетическая концепция развития мобильной техники позволит полностью реализовать общие технические требования в мобильном МЭК решить проблему разработки и внедрения мобильных МЭК.

На основе анализа проблем, стоящих перед мобильной техникой в отраслях АПК, сформулированы основные технические требования к мобильным МЭК:

1) многофункциональность;

2) модульная компоновка на основе типизации и конструктивной унификации;

3) многотопливность, энергоэффективность;

4) энергонасыщенность мобильного энергетического средства выше 20 кВт/т;

5) утилизация сбросового тепла;

6) автономная работа энергетических модулей;

7) согласованность характеристик мобильного энергетического средства (энергетического модуля), технологических модулей и тяговых модулей;

8) высокий коэффициент использования времени смены;

9) возможность параллельной работы мобильного МЭК с энергосистемой;

10) возможность применения мобильного МЭК в качестве резервного источника энергии;

11) обеспечение высокого качества получаемой электрической и тепловой энергии;

12) надежность, ресурс и эффективность функционирования мобильных МЭК;

13) типизация и унификация мобильного парка для отраслей АПК, энергетического обо-

рудования и комплектующих, топлив и моторных масел;

14) топливная экономичность, затраты на техническое обслуживание и ремонт;

15) оптимальное уплотнение двигателями почвы;

16) устойчивость движения МЭК;

17) защита окружающей среды при использовании энергетического оборудования;

18) ремонтпригодность;

19) транспортабельность;

20) высокий уровень интеллектуализации и роботизации;

21) демпфирование колебаний в конструкции.

В связи с этим оценка эффективности применения МЭК должна решаться в многокритериальной постановке.

3. Постановка задачи многокритериальной оптимизации

Для решения задачи установления весовости критериев качества МЭК-конструктивных и функциональных свойств МЭК требуется определить математические модели этих критериев. В ряде случаев они не поддаются формализации, то есть найти математические зависимости критериев качества от варьируемых параметров невозможно. Тогда необходимо проведение экспертного анализа критериев качества

Программа экспертного анализа заключалась в том, чтобы с помощью группы экспертов из 18 критериев качества и 7 функциональных ограничений выбрать наиболее значимые для оценки эффективности роботизации с позиций критериев качества МЭК.

В основу экспертного анализа положена методика расчета коэффициента конкордации по каждой группе факторов как меры согласованности группы экспертов. В качестве экспертов выбраны ведущие специалисты РФ с научными степенями от кандидатов до докторов технических наук, в том числе в звании академиков в области робототехники Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, а также специалисты других НИИ и КБ. В экспертизе участвовали независимо друг от друга 30 человек.

Степень согласованности мнений группы экспертов по важности факторов в соответствии с поставленной задачей определяет коэффициент конкордации. Он вычисляется по формуле

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3-n)},$$

где S – сумма квадратов разности между суммой рангов, присвоенных всеми экспертами каждому фактору, и средним значением сумм рангов всех факторов; n – число факторов; m – число экспертов в группе.

$$S = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m R_{ij})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij})^2}{n},$$

где R_{ij} – ряд в группе после ранжирования по значимости.

Кроме того, коэффициент конкордации Кендалла, или коэффициент множественной ранговой корреляции, нужен для того, чтобы выявить согласованность мнений экспертов по нескольким факторам.

Чтобы определить значимость коэффициента конкордации, найдем критерий согласованности Пирсона.

$$X^2 = \frac{12S}{mn(n+1)} = n(m-1)W;$$

$$W = 0,13;$$

$$X^2 = 66,4;$$

$$X_{\text{табл}}^2 = 27,5.$$

Анализ полученных данных позволил определить степень согласованности мнений экспертов, которая оказалась слабой. Однако вычисленный X^2 после сравнения с табличным значением для числа степеней свободы $K = 17$ и при заданном уровне значимости $\alpha = 0,05$ показал, что рассчитанный W – величина не случайная, а потому полученные результаты имеют смысл, обладают научной новизной и могут использоваться в дальнейших исследованиях.

Анализ результатов экспертной оценки установил, что наиболее значимы три критерия:

- 1) совокупные затраты на эксплуатацию МЭК;
- 2) суммарные затраты на технический осмотр и ремонт;
- 3) энергоэффективность.

Очень близки к этой группе факторов оказались производительность и давление движителей на почву.

Все выбранные критерии качества и функциональные ограничения играют большую роль при оценке эффективности МЭК с применением многокритериальной постановки задачи.

Применение мобильных МЭК даст возможность не только оптимально распределить его сцепную массу и тяговое усилие по полю, но и снять ограничение на мощность и массу комплекса, которые будут зависеть от планируемой его производительности и размеров поля. Большую роль будут играть активные рабочие органы, имеющие электропривод. Это позволит максимально повысить энергонасыщенность комплекса, которая напрямую связана с его производительностью, тягово-сцепными свойствами, металлоемкостью и потерями мощности на самопередвижение.

Таким образом, широкомасштабное внедрение мобильных многофункциональных энерго-технологических комплексов для нужд АПК на основе тягово-энергетической концепции обеспечит надежность, экологическую, энергетическую и экономическую эффективность, конкурентоспособность на мировом уровне. В разы увеличится производительность труда в АПК, повысится плодородие почвы, сократится негативное воздействие на окружающую среду, значительно уменьшится металлоемкость мобильных комплексов, снизится себестоимость сельхозпроизводства, повысится топливная экономичность, что создаст рабочие места в сельском хозяйстве и обеспечит население качественной и безопасной пищевой продукцией. Это позволит совершить прорыв в экономике АПК и заложить предпосылки для освоения более 30,0 млн га пахотной земли.

Заключение

Повсеместное внедрение интеллектуальных МЭК в растениеводстве даст возможность в кратчайшие сроки освоить и ввести в севооборот десятки миллионов пашен в сельском хозяйстве с минимальными энергетическими и экологическими затратами. Разработка эффективных принципов и способов интеграции МЭК повысит производительность и надежность интегрированных энергетических систем и изолированных энергорайонов, а также поспособствует реализации в полном объеме функционала «активного потребителя».

Список литературы

1. Андреев В.М., Баринев В.А., Варфоломеев С.Д., Годжаев З.А., Гришин В.И., Дьяконов А.А., Есяков С.Я., Лачуга Ю.Ф., Каляев И.А., Лукин К.А., Матюхин В.Ф., Панченко В.Я., Редько И.Я., Рокецкий Л.Ю., Сигов А.С., Стенников В.А., Шестаков А.Л., Цивадзе А.Ю. Создание

комплексных интегрированных систем энергоснабжения на базе инновационных технологий в условиях, происходящих в мире процессов // *Электричество*. 2020. № 3. С. 4–12. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-3-4-12>

2. Редько И.Я., Малоземов А.А., Малоземов Г.А., Наумов А.В., Козьминых Д.В. Эффективность использования инверторных энергоустановок в составе многофункциональных энерготехнологических комплексов // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 244–253. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253>

3. Лачуга Ю.Ф., Стребков Д.С., Годжаев З.А., Редько И.Я. Электрификация сельскохозяйственных мобильных энергосредств на основе тягово-энергетической концепции развития техники // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 260–270. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>

4. Годжаев З.А., Годжаев Т.З., Малахов И.С. Настоящее и будущее сельскохозяйственных автомобилей на электротяге // *Силовая энергетика и электроника перспективных автомобилей: материалы Всероссийской научно-практической конференции / отв. ред. В.И. Прядкин. Воронеж, 2021. С. 4–9. http://doi.org/10.34220/PEEPC2021_4-9*

5. Годжаев З.А., Сенькевич С.Е., Кузьмин В.А. Перспективные проекты по созданию роботизированных мобильных энергетических средств сельскохозяйственного назначения // XII мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2019) (Дивноморское, Геленджик, 23–28 сентября 2019 г.): материалы: в 4 т. Т. 2. Ростов н/Д – Таганрог, 2019. С. 127–129.

6. Годжаев З.А., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Зубина В.А. Сельскохозяйственный тракторный парк как объект цифровизации // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. № 4 (33). С. 88–96.

7. Годжаев З.А., Лачуга Ю.Ф. Энергоэффективные мобильные многофункциональные тяговые и транспортно-технологические средства цифрового сельского хозяйства // *Энергосбережение и энергоэффективность – динамика развития: IX Международный конгресс: сборник тезисов докладов*. СПб., 2019. С. 53–56.

8. Годжаев З.А. Создание высокоэффективных автоматизированных электроприводов для транспортно-технологических средств АПК // *Прогресс транспортных средств и систем – 2018: материалы международной научно-практической конференции*. Волгоград, 2018. С. 36–42.

9. Kotiev G.O., Gumerov I.F., Stadukhin A.A., Kositsyn B.B. Selection of the required deceleration for high-mobility wheeled vehicles with wear resistant brake systems // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 879. 0012030. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/819/1/012030>

10. Kotiev G., Padalkin B., Miroshnichenko A., Stadukhin A., Kositsyn B. A theoretical study on the highspeed electric tracked vehicle mobility // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 820. 00122012. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012012>

References

1. Andreyev VM, Barinov VA, Varfolomeyev SD, Godzhaev ZA, Grishin VI, Dyakonov AA, Yesyakov SYa, Lachuga YF, Kalyayev IA, Lunin KA, Matyukhin VF, Panchenko VYa, Redko IYa, Roketskiy LYu, Sigov AS, Stennikov VA, Shestakov AL, Tsvadze AYu. Development of comprehensive integrated power supply systems with the use of innovation technologies under the conditions of processes occurring around the world. *Elektrichestvo*. 2020;(3):4–12. (In Russ.) <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2020-3-4-12>

2. Redko IYa, Malozemov AA, Malozemov GA, Naumov AV, Kozminykh DV. Efficiency of using inverter power plants as part of multifunctional energy technology complexes. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):244–253. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-244-253>

3. Lachuga YuF, Strebkov DS, Godzhaev ZA, Redko IYa. Electrification of agricultural mobile power facilities based on the traction and energy concept of technology development. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(4):260–270. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-260-270>

4. Godzhaev ZA, Godzhaev TZ, Malakhov IS. Present and future of agricultural electric vehicles. In: Pryadkin VI. (ed.) *Power Engineering and Electronics of Promising Cars: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Voronezh; 2021. p. 4–9. http://doi.org/10.34220/PEEPC2021_4-9

5. Godzhaev ZA, Senkevich SE, Kuzmin VA. Promising projects for the creation of robotic mobile energy facilities for agricultural purposes. *Materials of the XII Multi-Conference on Management Problems (ICPU-2019) (Divnomorskoe, Gelendzhik, 23–28 September 2019)* (vol. 2). Rostov-on-Don, Taganrog; 2019. p. 127–129. (In Russ.)

6. Godzhaev ZA, Shevtsov VG, Lavrov AV, Zubina VA. Agricultural tractor park as an object of digitalization. *Innovations in Agriculture*. 2019;(4(33)):88–96. (In Russ.)

7. Godzhaev ZA, Lachuga YuF. Energy-efficient mobile multifunctional traction and transport-technological means of digital agriculture. *Energy Saving and Energy Efficiency – Dynamics of Development: IX International Congress: a collection of Abstracts of Pre-Treasures*. St. Petersburg; 2019. p. 53–56. (In Russ.)

8. Godzhaev ZA. Creation of highly efficient automated electric drives for transport and technological

means of agriculture. *Progress of Vehicles and Systems – 2018: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Volgograd; 2018. p. 36–42. (In Russ.)

9. Kotiev GO, Gumerov IF, Stadukhin AA, Kositsyn BB. Selection of the required deceleration for high-mobility wheeled vehicles with wear resistant brake systems. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engi-*

neering. 2020;879:0012030. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/819/1/012030>

10. Kotiev G, Padalkin B, Miroshnichenko A, Stadukhin A, Kositsy, B. A theoretical study on the high-speed electric tracked vehicle mobility. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;820:00122012. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012012>

Сведения об авторах

Лачуга Юрий Федорович, доктор технических наук, профессор, академик РАН, член Президиума РАН, академик РАСХН, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук, Российская академия наук, Российская Федерация, 119334, Москва, Ленинский пр-кт, д. 32А. Scopus Author ID: 57213157355, eLIBRARY SPIN-код: 1128-3299. E-mail: akadema1907@mail.ru

Годжаев Захид Адыгезалович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заместитель директора, Федеральный научный агроинженерный центр, Всероссийский институт механизации, Российская Федерация, 109428, Москва, 1-й Институтский пр-д, д. 5. ORCID: 0000-0002-1665-3730, Scopus Author ID: 57115314500, eLIBRARY SPIN-код: 1892-8405. E-mail: fic51@mail.ru

Редько Иван Яковлевич, доктор технических наук, профессор, руководитель направления стратегии развития электроэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Российская Федерация, 454080, Челябинск, пр-кт Ленина, д. 76. ORCID: 0000-0002-0259-1268, Scopus Author ID: 6603047041, eLIBRARY AuthorID: 420014. E-mail: redko_itya@mail.ru

About the authors

Yury F. Lachuga, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Academician of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences, Russian Academy of Sciences, 32A Leninsky Prospekt, Moscow, 119334, Russian Federation. Scopus Author ID: 57213157355, eLIBRARY SPIN-code: 1128-3299. E-mail: akadema1907@mail.ru

Zahid A. Godzhaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director, Federal Scientific Agroengineering Center, All-Union Research Institute of Agricultural Mechanization, 5 1-i Institutskii Proezd, Moscow, 109428, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1665-3730, Scopus Author ID: 57115314500, eLIBRARY SPIN-code: 1892-8405. E-mail: fic51@mail.ru

Ivan Ya. Redko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Electric Power Industry Development Strategy, South Ural State University, 76 Prospekt Lenina, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-0259-1268, Scopus Author ID: 6603047041, eLIBRARY AuthorID: 420014. E-mail: redko_itya@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-30-37
UDC 621.78.01:621.785-97

Research article / Научная статья

Generating hydrodynamic surfaces by families of Lamé curves for modelling submarine hulls

Valery V. Karnevich

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

✉ valera.karnevich@gmail.com

Article history

Received: December 19, 2021

Revised: February 23, 2022

Accepted: February 28, 2022

Keywords:

hydrodynamic surface, algebraic surface,
submarine, vessel, midsection, Lamé curve

Abstract. This paper investigates the construction of hydrodynamic surfaces, which are defined by algebraic equations and describe the theoretical hull of a vessel. A technique for automation of generating hydrodynamic surfaces is proposed. This technique allows to create a vast variety of hull shapes, for which Lamé curves with variable exponents are used as surface generator lines. The surface is constructed by a family of curves in one of the three mutually perpendicular planes, which permits to obtain three algebraically different, but geometrically identical surfaces. This paper introduces parametric equations for each of the three surfaces, generated by families of sections, buttocks and waterlines in the form of Lamé curves. The algorithm of modelling a submarine hull with different fore and aft bodies and a parallel middle body by a closed surface is demonstrated and the modelling results are illustrated. The presented technique may be effectively applied at the early stages of ship design when choosing the optimal hull shape, for which a number of surfaces need to be considered.

For citation

Karnevich V.V. Generating hydrodynamic surfaces by families of Lamé curves for modelling submarine hulls. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):30–37. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-30-37>

Построение гидродинамических поверхностей каркасами из кривых Ламе на примере корпуса подводной лодки

В.В. Карневич

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ valera.karnevich@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 19 декабря 2021 г.

Доработана: 23 февраля 2022 г.

Принята к публикации: 28 февраля 2022 г.

Аннотация. Исследуется построение гидродинамических поверхностей, которые описываются аналитическими уравнениями и формируют теоретический корпус судна. Предлагается методика автоматизации построения гидродинамических поверхностей с возможностью создания

© Karnevich V.V., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Ключевые слова:

гидродинамическая поверхность, алгебраическая поверхность, субмарина, подводная лодка, судно, мидельшпангоут, кривые Ламе

широкого разнообразия форм корпусов, для чего используются кривые Ламе с произвольными степенями как образующие каркас поверхности. Поверхность образуется каркасом сечений в одной из трех взаимно перпендикулярных плоскостей, что позволяет получить три алгебраически отличающиеся, но геометрически идентичные поверхности. Впервые выводятся параметрические уравнения каждой из таких трех поверхностей, образованных каркасами теоретических шпангоутов, батоксов и ватерлиний в форме кривых Ламе. Продемонстрирован алгоритм моделирования корпуса подводной лодки замкнутой поверхностью с отличающимися носовой и хвостовой частями, а также с параллельной центральной вставкой и проиллюстрированы результаты моделирования. Представленная методика может эффективно применяться на ранних этапах проектирования судна при выборе оптимальной формы поверхности корпуса, для чего необходимо рассмотреть ряд различных форм.

Для цитирования

Карневич В.В. Построение гидродинамических поверхностей каркасами из кривых Ламе на примере корпуса подводной лодки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 30–37. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-30-37>

Introduction

The hull form of a vessel determines the key hydrodynamic properties: maneuverability and water resistance [1]. Therefore, hull shape optimization is one of the primary tasks of naval architects. The pioneer investigations in this field may be attributed to William Froude, who by order of the Royal Institution of Naval Architects worked on identifying the most efficient ship hull form. He was able to confirm the applicability of his theoretical findings by testing physical models of ships in model basins, which were constructed for the first time ever specifically for this purpose. He derived a formula for extrapolation of small-scale test results onto the real conditions and validated its efficiency by full-scale experiments [2]. However, building and testing ship models even at the present day is substantially expensive and time-consuming, not to mention full-scale tests [3]. For this reason, today, in studying and designing ships precedence is given to computer analysis, CFD (Computational Fluid Dynamics) in particular. Authors of [4] evaluate the accuracy of the CFD method in simulating model basin tests using various cases of geometric shapes of ship hulls.

The initial step in computer analysis is creating a geometric model. The most widespread practice in geometric modelling of ship hulls is the construction of hull wireframe by a set of contours in mutually perpendicular planes: by cross-section, buttock and waterline curves. Article [5] indicates that by defining a discrete wireframe, the hull surface may be constructed only approximately, since the points

that do not belong to the wireframe may not be uniquely determined. A finer wireframe increases the accuracy of the generated surface, but at the same time increases the amount of computational labor required for the analysis of the model. The authors of [6] studied hull geometry optimization with the use of AI (artificial intelligence) and concluded that the non-parametric surface model (defined by an array of point coordinates) is prone to a local optimization trap, and that the optimization direction in the parametric model (algebraic surface with a finite number of parameters) is largely affected by the first calculation iteration, so a combined model was processed by AI. Article [7] also draws attention to the disadvantages of discrete surfaces, in dynamic problems in particular, and proposes a number of structurally complex, but effective techniques of transforming hull model from a set of contours to a whole surface. Nonetheless, a parametric model is exceptionally convenient at the preliminary design stage, when it is necessary to consider a vast variety of hull forms and to use a minimal number of variables for this purpose.

This paper considers a method of modelling a ship hull with the help of algebraic surfaces, which are defined by a skeleton of three plane curves. These three curves coincide with midsection (in yOz plane), main buttock (in xOz plane) and waterline (in xOy plane), as demonstrated in Figure 1. Articles [8; 9] refer to such surfaces as hydrodynamic and point out that given the same three curves it is possible to generate three different algebraic surfaces. Article [10]

presents a technique for producing hydrodynamic surfaces, which are constructed by midsection line in the form of Lamé curve and parabolas in the other two perpendicular planes and which model a hull of a symmetric surface vessel. This paper proposes a more general model, where all three curves are Lamé

curves, and the algorithm of constructing a multi-piece surface of a vessel with different fore and aft bodies and a parallel middle body. Such surfaces may be applied in submarine hull design; an example of geometric modelling of which is given further below in this paper.

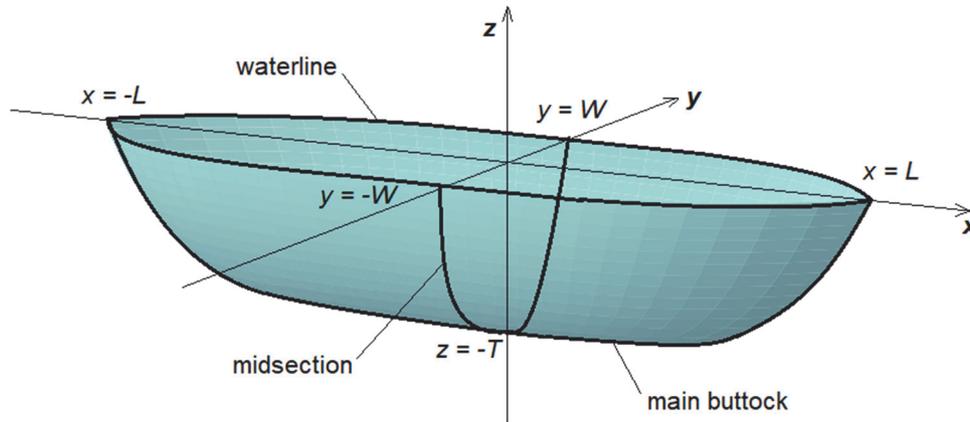


Figure 1. Hydrodynamic surface skeleton of three plane curves

Hydrodynamic surfaces generated by Lamé curves

Let us assume the three lines, which form the hull skeleton, to be in the form of Lamé curves in the corresponding planes:

– midsection:

$$|z|^n = T^n \left(1 - \frac{|y|^m}{W^m} \right); \quad (1)$$

– main buttock:

$$|z|^b = T^b \left(1 - \frac{|x|^a}{L^a} \right); \quad (2)$$

– waterline:

$$|y|^k = W^k \left(1 - \frac{|x|^j}{L^j} \right). \quad (3)$$

T, W, L are the geometric parameters of the hull (Figure 1), which are specified and which represent the height, width and length of the ship respectively.

Positive variable exponents n, m, b, a, k, j of three principal curves (1–3) allow to obtain a huge number of surface shapes. Lamé curves, also known as superellipses, with different values of these exponents are shown in Figure 2. For example, the mid-

section line at $n = m$ between 0 and 1 is concave in the form of a four-armed star; at $n = m = 1$ it represents a rhombus; at $n = m > 1$ it is convex and represents a circle in particular case of $n = m = 2$. With increasing values of $n = m$, Lamé curve approaches a rectangular shape.

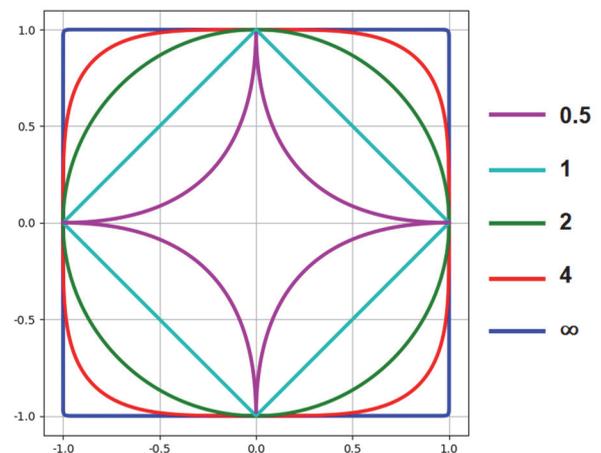


Figure 2. Shape of midsection line in the form of Lamé curve at different values of parameters $n = m = 0.5; 1; 2; 4; \infty$

Since the hull surface may be generated by families of sections in three different planes, and all the three resulting surfaces will be different algebraically, let us consider the construction of each individual surface below.

Hydrodynamic surface generated by a family of sections in yOz plane

Let us take midsection equation (1), which defines the contour of the vessel section in yOz plane, as the surface generator:

$$|z|^n = T(x)^n \left(1 - \frac{|y|^m}{W(x)^m} \right). \quad (4)$$

Midsection width W and height T vary depending on the particular section in yOz plane, i.e. depending on the x -coordinate, and they trace the waterline and main buttock respectively. Thus, variable width $W(x)$ can be obtained using equation (3):

$$W(x) = W \left(1 - \frac{|x|^j}{L^j} \right)^{1/k}, \quad (5)$$

and variable height $T(x)$ can be obtained using equation (2):

$$T(x) = T \left(1 - \frac{|x|^a}{L^a} \right)^{\frac{1}{b}}. \quad (6)$$

By substituting expressions (5) and (6) into equation (4), we obtain:

$$|z|^n = T^n \left(1 - \frac{|x|^a}{L^a} \right)^{n/b} \left[1 - \frac{|y|^m}{W^m \left(1 - \frac{|x|^j}{L^j} \right)^{m/k}} \right]. \quad (7)$$

Equation (7) is the algebraic equation of the first hydrodynamic surface. This equation may be represented in parametric form:

$$\begin{aligned} x &= x(u) = uL, \\ y &= y(u, v) = vW \left(1 - |u|^j \right)^{1/k}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$z = z(u, v) = \pm T \left(1 - |u|^a \right)^{1/b} \left(1 - |v|^m \right)^{1/n},$$

where $-1 \leq u \leq 1, -1 \leq v \leq 1$.

Hydrodynamic surface generated by a family of sections in xOz plane

The contour of the vessel section in xOz plane is the buttock line, so we take equation (2) as the generator:

$$|z|^b = T(y)^b \left(1 - \frac{|x|^a}{L(y)^a} \right), \quad (9)$$

where height T and length L vary with y and trace the midsection and waterline respectively.

Then, $T(y)$ is derived from equation (1):

$$T(y) = T \left(1 - \frac{|y|^m}{W^m} \right)^{1/n}, \quad (10)$$

and $L(y)$ is derived from equation (3):

$$L(y) = L \left(1 - \frac{|y|^k}{W^k} \right)^{1/j}. \quad (11)$$

The complete equation of the surface is obtained by substituting expressions (10) and (11) into equation (9):

$$|z|^b = T^b \left(1 - \frac{|y|^m}{W^m} \right)^{b/n} \left[1 - \frac{x^a}{L^a \left(1 - \frac{|y|^k}{W^k} \right)^{a/j}} \right]. \quad (12)$$

Parametric equations of the second hydrodynamic surface are:

$$\begin{aligned} y &= y(u) = uW, \\ x &= x(u, v) = vL \left(1 - |u|^k \right)^{1/j}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$z = z(u, v) = \pm T \left(1 - |u|^m \right)^{1/n} \left(1 - |v|^a \right)^{1/b},$$

where $-1 \leq u \leq 1, -1 \leq v \leq 1$.

Hydrodynamic surface generated by a family of sections in xOy plane

The contour of the vessel section in xOy plane is the waterline, so we take equation (3) as the generator:

$$|y|^k = W(z)^k \left(1 - \frac{|x|^j}{L(z)^j} \right), \quad (14)$$

where length L and width W vary with z and trace the main buttock and midsection respectively.

Therefore, $L(z)$ is derived from equation (2):

$$L(z) = L \left(1 - \frac{|z|^b}{T^b} \right)^{1/a}, \quad (15)$$

and $W(z)$ is y from equation (1), so

$$W(z) = W \left(1 - \frac{|z|^n}{T^n} \right)^{1/m}. \quad (16)$$

By substituting expressions (15) and (16) into equation (14)

$$|y|^k = W^k \left(1 - \frac{|z|^n}{T^n} \right)^{k/m} \left[1 - \frac{|x|^j}{L^j \left(1 - \frac{|z|^b}{T^b} \right)^{j/a}} \right], \quad (17)$$

we obtain the complete equation of the surface. This equation in the parametric form is

$$z = z(u) = uT,$$

$$x = x(u, v) = vL \left(1 - |u|^b \right)^{1/a}, \quad (18)$$

$$y = y(u, v) = \pm W \left(1 - |u|^n \right)^{1/m} \left(1 - |v|^j \right)^{1/k},$$

where $-1 \leq u \leq 1, -1 \leq v \leq 1$.

Algorithm of constructing submarine hull surface with different fore and aft bodies

Let us define variables L_f and L_a , which represent the lengths of fore and aft bodies of the vessel respectively. Height T and width W of both parts of the hull are the same for the purpose of joining the parts smoothly at $x = 0$ (Figure 3). The values of exponents m and n , which determine the surface shape in yOz plane, are also identical for both parts. The values of exponents a, b, j, k are specified for fore and aft parts separately.

The overall variation interval of the normalized independent variables is defined as $0 \leq u, v \leq 1$. Then, the complete surface consists of 8 fragments and is constructed by equations (8), (13) or (18) using Table 1.

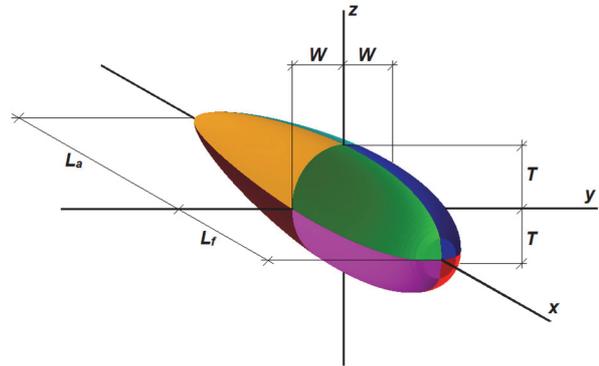


Figure 3. Surface fragments of submarine hull with different fore and aft bodies

Table 1

Signs of expressions for surface fragments of submarine with different fore and aft body shapes

Vessel part		Fore body ($L = L_f$)				Aft body ($L = L_a$)			
Fragment		1	2	3	4	5	6	7	8
Expression sign	x	+	+	+	+	-	-	-	-
	y	+	+	-	-	+	+	-	-
	z	+	-	+	-	+	-	+	-

The visualization of the three hydrodynamic surfaces generated by families of sections in different planes is performed taking $m = n = 2$, so that the section perpendicular to the x -axis (midsection) is in the shape of a circle. The values of the remaining parameters are chosen such that they reflect the general shape of a submarine hull without a parallel middle body [11]. The three hydrodynamic surfaces are shown in Figure 4.

In order to increase usable space, submarine hulls are often designed with a cylindrical insert

(parallel middle body) between the fore and aft bodies. Let us define the length of the parallel body as L_m and position it such that its middle point is loca-

ted at $x = 0$. Then, the fore and aft bodies are displaced to locations $x = +L_m/2$ and $x = -L_m/2$ respectively (Figure 5).

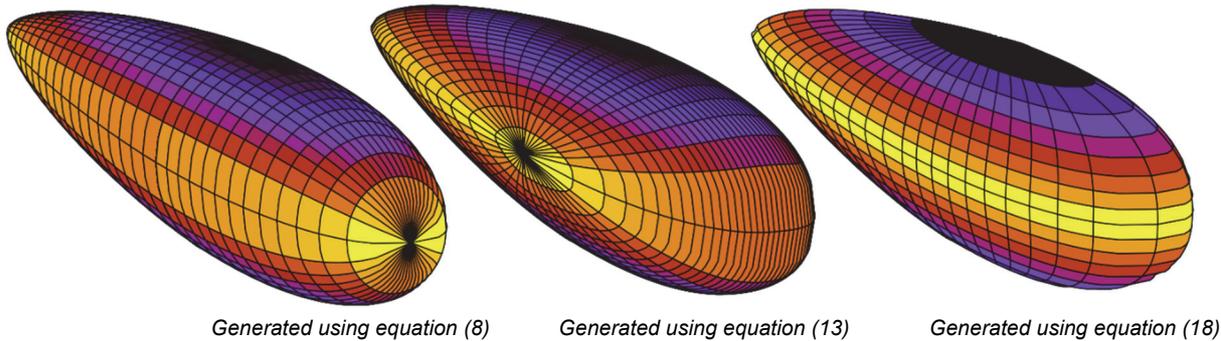


Figure 4. Three hydrodynamic surfaces with $L_r = 40$ m, $L_a = 20$ m, $W = T = 5$ m; $m = n = 2$; $a = b = j = k = 2.5$ (for fore body); $a = b = j = k = 1.5$ (for aft body)

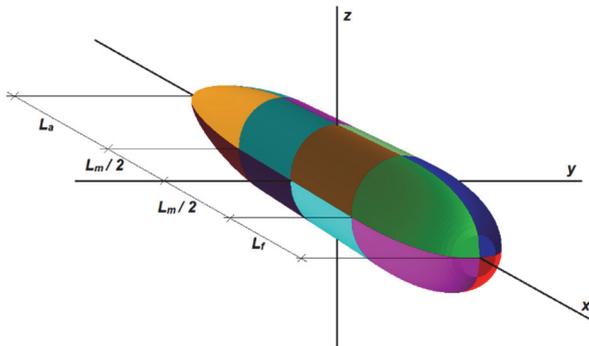


Figure 5. Surface fragments of submarine hull with a parallel middle body between fore and aft bodies

In the parametric equations of the fore and aft body fragments a term of $+L_m/2$ needs to be added to the expressions for x . Variation interval of parameters u and v remains to be from 0 to 1. Then, a fragment of the parallel middle body can be defined by the following parametric equations:

$$\begin{aligned} x &= x(u) = uL_m, \\ y &= y(v) = vW, \\ z &= z(u, v) = T(1 - |v|^m)^{1/n}, \end{aligned} \quad (19)$$

where the expression for z is obtained from equation (1), which specifies the shape of the midsection.

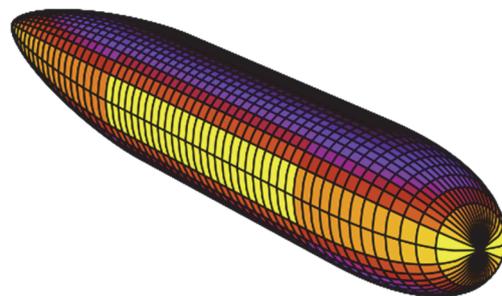
In other words, equations (19) may characterize not only cylindrical ($m = n = 2$) parallel middle bodies, but also any other arbitrary cross-section shape, which is allowed by the Lamé curve exponents. With that, all the surface fragments of a submarine need to connect

continuously and smoothly, so parameters m and n must be equal for all parts of the hull. The parallel middle body also consists of 8 fragments, the signs of expressions for which are taken according to Table 2.

Table 2

Vessel part		$0 \leq x \leq L_m/2$				$-L_m/2 \leq x \leq 0$			
		Signs of expressions for fragments of submarine parallel middle body							
Fragment		1	2	3	4	5	6	7	8
Expression sign	x	+	+	+	+	-	-	-	-
	y	+	+	-	-	+	+	-	-
	z	+	-	+	-	+	-	+	-

As an example, the visualization of a submarine hull with a parallel middle body is performed with the algorithm described above using equations (8) and (19) – family of sections in yOz plane. The geometric parameters are identical to the previously constructed surface (Figure 4), and parallel middle body length $L_m = 40$ m. The generated surface is shown in Figure 6.



Fore and aft bodies are generated by equations (8)

Figure 6. Surface of submarine hull with a parallel middle body and with $L_m = 40$ m, $L_r = 40$ m, $L_a = 20$ m, $W = T = 5$ m; $m = n = 2$; $a = b = j = k = 2.5$ (for fore body); $a = b = j = k = 1.5$ (for aft body)

Results

The hydrodynamic surfaces were visualized using Python programming language. Arrays containing the coordinates of points of the surfaces were computed according to the algorithms described above with the help of NumPy library. The surfaces were constructed using the arrays of points and visualized with the help of Matplotlib plotting library. This programming environment allows to achieve a high level of automation by leaving the geometric parameters, Lamé curve exponents and 3D plotting format arguments as the only variables.



Figure 7. Submarine hull manufacturing using segments of developable skin (Crown Copyright 2013, by Andrew Linnett, www.defenceimages.mod.uk, photo 45155780.jpg)

Some studies consider individual cases of hydrodynamic surfaces: encyclopedia [12] presents hydrodynamic surfaces with buttock and waterline curves as the 4th order parabolas and midsection in the form of Lamé curve with $m = 4$, $n = 1$, and also with $n = 2$, $m = 1/3$. Article [8] introduces explicit and parametric equations for two sets of three hydrodynamic surfaces with buttock and waterline in the form of the 2nd order parabola and midsection in the form of Lamé curve with $m = n = 2$, and also with $m = 4$, $n = 1$. Several particular surfaces are considered in [13; 14]. Article [10] presents the expressions for hydrodynamic surfaces with variable values of the exponents of the parabola, which defines the shape of the main buttock and waterline, and the Lamé curve exponents, which defines the shape of the midsection.

Hydrodynamic surfaces generated by families of plane algebraic curves cannot be developable surfaces, apart from the parallel middle body [10].

When manufacturing the hull, the theoretical surface must be approximated by segments of developable skin (Figure 7). If the hull is manufactured using composite material, approximation with developable segments may not be necessary.

Conclusion

The hull shape of real vessels is very complex and it must satisfy a number of design criteria. However, the presented equations for hydrodynamic surfaces and the algorithms of their construction may be considerably useful at the early stages of selecting the optimal hull shape.

It is worth to mention in regards to the versatility of the proposed model that in geometric modelling of submarines, the upper and lower sections may have different geometric form by specifying different heights T and different Lamé curve exponents of the corresponding surface fragments.

The analytical method of describing the hull shape allows extensive use of computer modelling, as was demonstrated by the case of constructing and visualizing submarine hull surfaces.

References

1. Basin AM, Anfimov VN. *Hydrodynamics of a vessel: water resistance, propellers, controllability and pitching*. Leningrad: Rechnoi Transport Publ.; 1961. (In Russ.)
2. Brown DK. *The way of a ship in the midst of the sea: the life and work of William Froude*. Periscope Publishing Ltd.; 2006.
3. Doctors LJ. Optimization of marine vessels on the basis of tests on model series. *Journal of Marine Science and Technology*. 2020;25:887–900. <https://doi.org/10.1007/s00773-019-00687-4>
4. Tober H. *Evaluation of drag estimation methods for ship hulls*. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences; 2020.
5. Rychenkova AY, Klimenko ES, Borodina LN. Geometric modeling and quality assessment of the hull frame surface in COMPASS-3D CAD. *Russian Journal of Water Transport*. 2020;62:71–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.49>
6. Li Z, Weimin C. Key Technology of Artificial Intelligence in Hull Form Intelligent Optimization. *ICMAI 2020: Proceedings of the 2020 5th International Conference on Mathematics and Artificial Intelligence*. New York; 2020. p. 167–171. <http://doi.org/10.1145/3395260.3395296>
7. Kwang Hee Ko. A survey: Application of geometric modeling techniques to ship modeling and design. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2010;2(4):177–184. <http://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0034>

8. Krivoshapko SN. Hydrodynamic surfaces. *Ship-building*. 2021;(3):64–67. (In Russ.)

9. Krivoshapko SN. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design. *Ships and Offshore Structures*. Taylor & Francis; 2022. p. 1–9. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2062165>

10. Karnevich VV. Hydrodynamic surfaces with midsection in the form of Lamé curve. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2021;22(4):323–328. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328>

11. Jackson HA, Fast C, Abels F, Burcher R, Couch R. Fundamentals of submarine concept design. Discussion.

Transactions-Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1992;100:419–448.

12. Krivoshapko SN, Ivanov VN. *Encyclopedia of Analytical Surfaces*. Springer International Publishing Switzerland; 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11773-7>

13. Krivoshapko SN. On aero-hydro-dynamical surfaces given by algebraic plane curves. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2010;(2):3–4. (In Russ.)

14. Avdonev EYa. Analytical description of the ship hull surfaces. *Prikladnaya Geometriya i Inzhenernaya Grafika*. 1972;15:156–160. (In Russ.)

About the author

Valery V. Karnvich, Master of Technical Science, PhD student, Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6232-2676, eLIBRARY SPIN-code: 4233-3099. E-mail: valera.karnevich@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-38-46
УДК 62-713.3

Научная статья / Research article

Оценка работоспособности бензиновых электромагнитных форсунок по величинам среднего абсолютного отклонения объема тестовой жидкости

А.А. Ходяков , С.В. Хлопков ✉, В.В. Басова

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
✉ khlopkov-sv@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 28 ноября 2021 г.
Доработана: 15 января 2022 г.
Принята к публикации: 25 января 2022 г.

Ключевые слова:

электромагнитные форсунки, средние абсолютные отклонения, объем тестовой жидкости, грубый промах, метод extra flushing, ультразвук, измерительные цилиндры, режим, процедура

Аннотация. Проведена оценка технического состояния электромагнитных форсунок (ЭМФ) бензиновых двигателей с непосредственным впрыском топлива. Техническое состояние ЭМФ определялось с помощью стенда для очистки и тестирования форсунок. Использована поэтапная очистка форсунок от загрязнений, то есть в две стадии. На первом этапе применен режим extra flushing (без ультразвука). Моющим средством при таком способе очистки служила безводная моющая жидкость BG-210, состоящая из гидроочищенной тяжелой и легкой нефти, растворителя Стоддарда, 2-бутоксизанола, изопропилового спирта, ксилола. На втором этапе форсунки очищались в течение 10 мин в ультразвуковой ванне, наполненной моющей жидкостью LAVR Ln 2003. Показано, что рассчитанные средние абсолютные отклонения объема тестовой жидкости отражают не только присутствие в форсунках загрязнений, но и иллюстрирует течение процесса очистки. Средние абсолютные отклонения объема тестовой жидкости после химической обработки и воздействия ультразвуком ниже в 2–9 раз аналогичных параметров, полученных в неочищенных химическими реагентами и ультразвуком форсунках.

Для цитирования

Ходяков А.А., Хлопков С.В., Басова В.В. Оценка работоспособности бензиновых электромагнитных форсунок по величинам среднего абсолютного отклонения объема тестовой жидкости // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 38–46. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-38-46>

Evaluation of the gasoline electromagnetic injectors performance by the average absolute deviation values of the test liquid volume

Aleksandr A. Khodyakov , Sergey V. Khlopkov ✉, Vlada V. Basova

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation
✉ khlopkov-sv@rudn.ru

Article history

Received: November 28, 2021
Revised: January 15, 2022
Accepted: January 25, 2022

Abstract. An assessment of the technical condition of electromagnetic injectors (EMI) of gasoline engines with direct fuel injection has been carried out. The technical condition of the EMI was assessed using a stand for cleaning and testing injectors. A step-by-step cleaning of the nozzles from contami-



Keywords:

electromagnetic nozzles, average absolute deviations, test liquid volume, gross slip, extra flushing method, ultrasound, measuring cylinders, mode, procedure

nation was used, that is, in two stages. At the first stage, the “extra flushing” mode (without ultrasound) was applied. The detergent for this cleaning method was anhydrous BG-210 washing liquid, consisting of hydrotreated heavy and light oils, Stoddard’s solvent, 2-butoxyethanol, isopropyl alcohol, and xylene. At the second stage, the nozzles were cleaned for 10 minutes in an ultrasonic bath filled with LAVR Ln 2003 washing liquid. It is shown that the calculated average absolute deviations of the test liquid volume reflect not only the presence of contaminants in the nozzles, but also illustrates the cleaning process. The average absolute deviations of the volume of the test liquid after chemical treatment and exposure to ultrasound are 2–9 times lower than those obtained in nozzles that were not cleaned with chemical reagents and ultrasound.

For citation

Khodyakov AA, Khlopkov SV, Basova VV. Evaluation of the gasoline electromagnetic injectors performance by the average absolute deviation values of the test liquid volume. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):38–46. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-38-46>

Введение

Известно, что техническое состояние (ТС) электромагнитных форсунок (ЭМФ) оказывает влияние на работу бензинового двигателя [1–10]. Проявлениями нарушений ТС устройства впрыска топлива являются неустойчивая работа двигателя (рывки и провалы при увеличении нагрузки на силовой агрегат), снижение его мощности, увеличение расхода топлива, повышенная токсичность отработавших газов [1–3].

Очистку форсунок от загрязнений проводят с помощью добавляемых в находящийся в топливном баке бензин химических реагентов или непосредственной подачей специальной жидкости на вход топливной рампы. Снятые с двигателя форсунки очищают от загрязнений, используя метод extra flushing (химическая обработка без ультразвука), и в ультразвуковых ваннах, в водных растворах, содержащих поверхностно-активные вещества [4; 10].

Техническое состояние ЭМФ оценивают по отклонениям пропускной способности (статической и динамической производительности) от эталонного значения (новые форсунки) или по отклонению от среднего расхода тестовой жидкости (ТЖ) при испытании снятых с двигателей форсунок на стендах [1; 2; 5; 6; 8; 11–14]. При этом пропускная способность, расход тестовой жидкости, выраженные в относительных единицах, могут быть как со знаком плюс (увеличенная пропускная способность, увеличенный расход), так и со знаком минус (уменьшенная пропускная способность, уменьшенный расход). Такое условное деление не позволяет провести градацию загрязненности форсунок. Поэтому целью данной работы стали

стендовые испытания снятых с двигателей форсунок и оценка по рассчитанным средним абсолютным отклонениям объема тестовой жидкости технического состояния устройств, присутствия в них загрязнений.

1. Экспериментальная часть

Объекты исследования – электромагнитные форсунки бензиновых двигателей с непосредственным впрыском топлива. Форсунки эксплуатировались в силовых агрегатах автомобилей BMW F10, Skoda Fabia, KIA Optima, KIA Sorento. Испытания проводили на четырех комплектах форсунок (в каждом комплекте четыре форсунки), снятых с двигателей автомобилей с пробегом от 120 до 190 тыс. км. Испытывали форсунки Siemens Bosch 0261 500 109 (а/м BMW F10), VAG 04E 906 036 AF (а/м Skoda Fabia), Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) и Continental 35310-2G710 (а/м KIA Sorento).

Техническое состояние ЭМФ оценивали, используя стенд для очистки и тестирования форсунок с ультразвуковой ванной и функцией extra flushing. В качестве тестовой использовали жидкость LAVR Ln 2004. Проверку форсунок на герметичность осуществляли с помощью функции «Тест на утечки» при давлении 8 бар. Опыт проводили, принимая во внимание не только уровень тестовой жидкости в измерительном цилиндре, но и формирование менисков на соплах форсунок.

Работоспособность ЭМФ проверяли в автоматическом режиме (АР). Параметром, связанным с производительностью форсунок, был объем (q , мл) тестовой жидкости, поступающей в мерные ци-

линдры при испытании ЭМФ на стенде. Объем ТЖ оценивали по ее уровню в цилиндрах. Параметр q полностью открытой форсунки определяли по данным, полученным на режиме «Пролив» (АР-1). Оценивали также q в режиме имитации работы двигателя на холостом ходу (800 об·мин⁻¹; АР-2). Объем тестовой жидкости измеряли в режиме имитации частоты вращения коленчатого вала $n = 3500$ об·мин⁻¹ (АР-3), $n = 5200$ об·мин⁻¹ (АР-4), а также имитируя режим (АР-5) динамических разгонов (800–5200 об·мин⁻¹) и торможений (5200–800 об·мин⁻¹).

Минимальное число измерений q , определяемым по объему ТЖ в мерных цилиндрах, рассчитывали по формуле [15]:

$$n = \frac{t_{\gamma}^2 \cdot \omega^2}{\varepsilon^2}, \quad (1)$$

где t_{γ} – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности γ (аналогичный коэффициент Стьюдента только при $n = \infty$); ω – коэффициент вариации; ε – относительная погрешность вычисления случайной величины (требуемая точность результата $\varepsilon = \pm 2\%$).

В результате проведенных расчетов установлено, что число повторных испытаний для требуемой точности составило ~ 1 измерение.

Форму факела распыла форсунок оценивали при давлении ТЖ 4–6 бар. Для лучшей визуализации формы, принимаемой порцией выходящей из сопла жидкости, использовали специальное устройство, позволяющее подавать в ЭМФ под давлением воздух.

Очистку форсунок от загрязнений проводили поэтапно, в две стадии. На первом этапе использовали режим extra flushing (без ультразвука). Моющим средством при таком способе очистки была выбрана безводная моющая жидкость ВГ-210, состоящая из гидроочищенной тяжелой и легкой нефти, растворителя Стоддарда, 2-бутоксиэтанола,

изопропилового спирта, ксилола. Процедура extra flashing является аналогом проточного метода очистки форсунок, но отличается от него тем, что для повышения степени очистки в поток моющей жидкости через специальный клапан подается воздух под давлением на 2 бара ниже давления моющей жидкости в рампе. Насыщение моющей жидкости воздушными пузырьками усиливает очищающее действие средства за счет эффектов «кипения» и гидростатического удара, возникающего в момент запыриания распылителя форсунки. Все это повышает динамическое давление внутри форсунки и приводит к разрыву пузырьков воздуха, что можно считать схожим с процессом кавитации при воздействии на жидкость ультразвука.

На втором этапе в течение 10 мин проводили ультразвуковую очистку форсунок от загрязнений. В качестве моющей жидкости использовали LAVR Ln 2003.

После каждого этапа очистки проверяли с помощью тестовой жидкости работоспособность форсунок.

2. Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований получены данные, позволяющие после статистико-математической обработки результатов опытов судить о работоспособности форсунок. Статистико-математическую обработку данных проводили, используя табличный процессор Microsoft Office Excel [16].

Техническое состояние комплекта форсунок оценивали по среднему абсолютному отклонению (среднее линейное отклонение):

$$\bar{d} = \frac{\sum |q_i - \bar{q}|}{n}, \quad (2)$$

где q_i – объем тестовой жидкости, поступающей в мерные цилиндры при испытании ЭМФ на стенде (i от 1 до 4), мл; \bar{q} – среднее значение объема тестовой жидкости, мл.

Таблица 1

Значения объема ТЖ в измерительных цилиндрах q_{AP-1} при испытании (режим «Пролив») форсунок до процедур воздействия на устройства жидкости ВГ-210 и ультразвука, среднее значение объема \bar{q}_{AP-1} , величины отклонений объема от среднего ($q_i - \bar{q}$)_{AP-1}, среднее абсолютное отклонение \bar{d}

ЭМФ	q_{AP-1} , мл				\bar{q}_{AP-1} , мл	$(q_i - \bar{q})_{AP-1}$, мл				\bar{d} , мл
Bosch 0 261 500 109 (а/м BMW F10)	67	46	58	66	59	+8	-13	-1	+7	7,3
VAG 04E 906 036 AF (а/м Skoda Fabia)	31	32	32	23	30	+2	+3	+3	-7	3,8
Continental 35310-2G710 (а/м KIA Sorento)	69	69	67	67	68	+1	+1	-1	-1	1,0
Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima)	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0,0

Table 1

Values of the volume of test fluid in measuring cylinders q_{AM-1} during testing (“Spill” mode) of injectors before the procedures for exposing devices to BG-210 liquid and ultrasound, the average value of the volume \bar{q}_{AM-1} , the volume deviations from the average $(q_i - \bar{q})_{AM-1}$, mean absolute deviation \bar{d}

EMI	q_{AM-1} , ml				\bar{q}_{AM-1} , ml	$(q_i - \bar{q})_{AM-1}$, ml				\bar{d} , ml
Bosch 0 261 500 109 (vehicle BMW F10)	67	46	58	66	59	+8	-13	-1	+7	7.3
VAG 04E 906 036 AF (vehicle Skoda Fabia)	31	32	32	23	30	+2	+3	+3	-7	3.8
Continental 35310-2G710 (vehicle KIA Sorento)	69	69	67	67	68	+1	+1	-1	-1	1.0
Continental 35310-2G710 (vehicle KIA Optima)	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0.0

Таблица 2

Значения объема ТЖ в измерительных цилиндрах q при испытании (в режиме AP-1-5) форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) до процедур воздействия на устройство жидкости BG-210 и ультразвука, среднее значение q (\bar{q}), величины отклонений объема от среднего $(q_i - \bar{q})$ и среднее абсолютное отклонение \bar{d}

Режим испытания	q , мл				\bar{q} , мл	$(q_i - \bar{q})$, мл				\bar{d} , мл
AP-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0,0
AP-2	33	30	33	34	33	0	-3	0	+1	1,0
AP-3	36	35	37	37	36	0	-1	+1	+1	0,8
AP-4	32	30	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1,5
AP-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0,8

Table 2

Values of the volume of test fluid in the measuring cylinders q during testing (in the AM-1-5 mode) of Continental 35310-2G710 injectors (KIA Optima vehicles) before the procedures for exposing the device to BG-210 fluid and ultrasound, the average value of q (\bar{q}), the magnitude of the deviations of the volume from the mean $(q_i - \bar{q})$ and the mean absolute deviation \bar{d}

Test mode	q , ml				\bar{q} , ml	$(q_i - \bar{q})$, ml				\bar{d} , ml
AM-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0.0
AM-2	33	30	33	34	33	0	-3	0	+1	1.0
AM-3	36	35	37	37	36	0	-1	+1	+1	0.8
AM-4	32	30	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1.5
AM-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0.8

Таблица 3

Значения объема ТЖ в измерительных цилиндрах q при испытании (в режиме AP-1-5) форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) после химической обработки устройств, среднее значение q (\bar{q}), величины отклонений объема от среднего $(q_i - \bar{q})$ и среднее абсолютное отклонение \bar{d}

Режим испытания	q , мл				\bar{q} , мл	$(q_i - \bar{q})$, мл				\bar{d} , мл
AP-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0,0
AP-2	33	30	33	34	34	0	-3	0	+1	1,0
AP-3	35	35	37	37	36	-1	-1	+1	+1	1,0
AP-4	32	30	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1,5
AP-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0,8

Table 3

Values of the volume of test fluid in measuring cylinders q during testing (in AM-1-5 mode) of Continental 35310-2G710 injectors (KIA Optima vehicles) after chemical treatment of devices, average value q (\bar{q}), deviations volume from the mean $(q_i - \bar{q})$ and the mean absolute deviation \bar{d}

Test mode	q , ml				\bar{q} , ml	$(q_i - \bar{q})$, ml				\bar{d} , ml
AM-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0.0
AM-2	33	30	33	34	34	0	-3	0	+1	1.0
AM-3	35	35	37	37	36	-1	-1	+1	+1	1.0
AM-4	32	30	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1.5
AM-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0.8

Таблица 4

Значения объема ТЖ в измерительных цилиндрах q при испытании (в режиме AP-1-5) форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) после воздействия ультразвука, среднее значение q (\bar{q}), величины отклонений объема от среднего ($q_i - \bar{q}$) и среднее абсолютное отклонение \bar{d}

Режим испытания	q , мл				\bar{q} , мл	$(q_i - \bar{q})$, мл				\bar{d} , мл
AP-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0,0
AP-2	33	30	33	34	34	0	-3	0	+1	1,0
AP-3	36	35	37	37	36	-1	-1	+1	+1	1,0
AP-4	32	31	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1,5
AP-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0,8

Table 4

Values of test fluid volume in measuring cylinders q during testing (in AM-1-5 mode) of Continental 35310-2G710 injectors (KIA Optima vehicles) after exposure to ultrasound, average value q (\bar{q}), volume deviations from the mean ($q_i - \bar{q}$) and the mean absolute deviation \bar{d}

Test mode	q , ml				\bar{q} , ml	$(q_i - \bar{q})$, ml				\bar{d} , ml
AP-1	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0.0
AP-2	33	30	33	34	34	0	-3	0	+1	1.0
AP-3	36	35	37	37	36	-1	-1	+1	+1	1.0
AP-4	32	31	32	28	31	+1	-1	+1	-3	1.5
AP-5	30	29	31	31	30	0	-1	+1	+1	0.8

В табл. 1 приведены величины объема тестовой жидкости в измерительных цилиндрах при испытании форсунок до процедур воздействия на устройства жидкости BG-210 и ультразвука.

Из сопоставления данных (табл. 1) следует, что параметр $(q_i - \bar{q})_{AP-1}$ в режиме, когда форсунки открыты полностью, изменяется от -13 до +8 мл, а \bar{d} от 0 до 7. Аналогичный эффект наблюдается и на других режимах испытания, даже и для тех устройств, у которых $\bar{d} = 0$ (табл. 1). Так, в табл. 2 приведены результаты испытаний форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) с $\bar{d} = 0$.

Из сопоставления данных (табл. 2–4) следует, что изменение отклонений от среднего и варьирование параметра \bar{d} идентично для форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) как до их очистки, так и после химической обработки или воздействия ультразвуком. Поэтому полученные здесь отклонения, отличающиеся от значений $(q_i - \bar{q})$ и \bar{d} (табл. 1), являются погрешностями измерения объема тестовой жидкости на стенде.

Из анализа представленных данных следует сделать вывод, что техническое состояние испытанных на стенде комплектов форсунок различно. Если форсунки Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) можно отнести к разряду чистых устройств, то форсунки (за исключением комплекта Bosch 0 261 500 109 (а/м BMW F10); $\bar{d} = 7,3$) с параметром \bar{d} от 1 до 3,8 (табл. 1) од-

нозначно охарактеризовать как грязные нельзя. Поэтому было принято решение оценивать присутствие в форсунках загрязнений с помощью проверки данных \bar{d} на грубый промах.

Проведенный по уравнению (2) расчет показал, что в значениях \bar{d} для форсунок Continental 35310-2G710 (а/м KIA Optima) грубый промах отсутствует. Поэтому считалось, что наличие в значениях средних абсолютных отклонений грубого промаха является свидетельством присутствия в форсунках загрязнений.

Наличие в данных грубого промаха проводили по величине максимального относительно отклонения [15]:

$$\tau_{\max} = \left| \frac{x_{\text{крит}} - \bar{x}}{S_n} \right|, \quad (3)$$

где $x_{\text{крит}}$ – максимальное значение \bar{d} ; \bar{x} – среднее значение \bar{d} ; S_n – стандартное отклонение.

Для выявления \bar{d} , соответствующих грубому промаху, рассчитанное значение τ_{\max} сопоставляли с его табличным аналогом $\tau_{\text{табл}}$. При $\tau_{\max} > \tau_{\text{табл}}$ считали, что в форсунках присутствуют загрязнения, при $\tau_{\max} < \tau_{\text{табл}}$ – форсунки чистые или загрязнены незначительно, то есть изменения объема тестовой жидкости, связанные с присутствием в форсунках загрязнений, перекрываются погрешностью измерения q_i .

Таблица 5

Средние абсолютные отклонения, среднее значение $\bar{d}(\bar{x})$, стандартное отклонение S_n , максимальное относительное отклонение τ_{\max} , табличное значение отклонения $\tau_{\text{табл}}$

Процедура	Режим испытания	ЭМФ			
		Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10)	VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima)
		\bar{d} , мл			
До очистки форсунок	AP-1	7,3	3,0	1,0	0,0
	AP-2	3,5	1,3	1,0	1,0
	AP-3	3,3	0,5	0,3	0,8
	AP-4	2,8	1,3	0,5	1,5
	AP-5	1,8	1,3	0,3	0,8
После химической обработки	AP-1	3,0	2,3	0,8	0,0
	AP-2	2,8	0,5	0,8	1,0
	AP-3	1,5	1,3	0,3	1,0
	AP-4	1,8	0,5	0,3	1,5
	AP-5	1,5	1,3	0,3	0,8
После воздействия ультразвука	AP-1	0,8	1,0	0,5	0,0
	AP-2	1,8	0,5	0,3	1,0
	AP-3	1,8	0,8	0,0	1,0
	AP-4	1,8	0,5	0,3	1,5
	AP-5	1,8	0,8	0,3	0,8
\bar{x}		2,49	1,13	0,47	0,85
S_n		1,53	0,72	0,30	0,50
τ_{\max}		3,14	2,61	1,80	1,30
$\tau_{\text{табл}}$		2,46			

Table 5

Average absolute deviations, mean value $\bar{d}(\bar{x})$, standard deviation S_n , maximum relative deviation τ_{\max} , tabular deviation value τ_{table}

Procedure	Test mode	EMI			
		Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10)	VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima)
		\bar{d} , ml			
Before cleaning the nozzles	AM-1	7.3	3.0	1.0	0.0
	AM-2	3.5	1.3	1.0	1.0
	AM-3	3.3	0.5	0.3	0.8
	AM-4	2.8	1.3	0.5	1.5
	AM-5	1.8	1.3	0.3	0.8
After chemical treatment	AM-1	3.0	2.3	0.8	0.0
	AM-2	2.8	0.5	0.8	1.0
	AM-3	1.5	1.3	0.3	1.0
	AM-4	1.8	0.5	0.3	1.5
	AM-5	1.5	1.3	0.3	0.8
After exposure to ultrasound	AM-1	0.8	1.0	0.5	0.0
	AM-2	1.8	0.5	0.3	1.0
	AM-3	1.8	0.8	0.0	1.0
	AM-4	1.8	0.5	0.3	1.5
	AM-5	1.8	0.8	0.3	0.8
\bar{x}		2.49	1.13	0.47	0.85
S_n		1.53	0.72	0.30	0.50
τ_{\max}		3.14	2.61	1.80	1.30
τ_{table}		2.46			

Таблица 6

Средние абсолютные отклонения, полученные при испытании форсунок в режим «Пролив»

Процедура	ЭМФ			
	Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10)	VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima)
	\bar{d} , мл			
До очистки форсунок	7,3	3,0	1,0	0,0
После химической обработки	3,0	2,3	0,8	0,0
После воздействия ультразвука	0,8	1,0	0,5	0,0

Table 6

Average absolute deviations obtained when testing injectors in the “Spill” mode

Procedure	EMI			
	Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10)	VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento)	Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima)
	\bar{d} , ml			
Before cleaning the nozzles	7.3	3.0	1.0	0.0
After chemical treatment	3.0	2.3	0.8	0.0
After exposure to ultrasound	0.8	1.0	0.5	0.0

Из сопоставления данных (табл. 5) следует, что для форсунок Bosch 0 261 500 109 (a/m BMW F10) и VAG 04E 906 036 AF (a/m Skoda Fabia) $\tau_{\text{макс}} > \tau_{\text{табл}}$, то есть соблюдается условие, при котором значения 7,3 и 3,0 являются свидетельством загрязнения форсунок. Для форсунок Continental 35310-2G710 (a/m KIA Sorento) и Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima) $\tau_{\text{макс}} < \tau_{\text{табл}}$. Следовательно, форсунки чистые или загрязнены незначительно. Комплекс форсунок Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima), как это показано ранее, можно отнести к разряду чистых форсунок.

В табл. 6 представлены средние абсолютные отклонения, полученные в режиме испытания форсунок «Пролив». Из сопоставления данных следует, что величина \bar{d} для всех форсунок, кроме Continental 35310-2G710 (a/m KIA Optima), закономерно изменяется. До очистки форсунок \bar{d} максимален, после воздействия ультразвука – минимален. После химической обработки параметр \bar{d} занимает промежуточное положение. Такое изменение \bar{d} , обусловленное воздействием химических реагентов и ультразвука на сопловую часть распылителя (корпус, иглу распылителя), свиде-

тельствует, что среднее абсолютное отклонение отражает не только присутствие в форсунках загрязнений, но и иллюстрирует течение процесса очистки. Так, \bar{d} после химической обработки и воздействия ультразвука ниже в 2–9 раз аналогичного параметра, полученного при испытании форсунок до их очистки.

Заключение

На основе полученных на стенде результатов испытаний, анализа и обсуждения данных проведена оценка технического состояния электромагнитных форсунок бензиновых двигателей с непосредственным впрыском топлива. Техническое состояние испытанных на стенде комплектов форсунок различно. Показано, что рассчитанные средние абсолютные отклонения объема тестовой жидкости отражают не только присутствие в форсунках загрязнений, но и иллюстрируют течение процесса очистки. Средние абсолютные отклонения объема тестовой жидкости после химической обработки и воздействия ультразвуком ниже в 2–9 раз аналогичных параметров, полученных в неочищенных химическими реагентами и ультразвуком форсунках.

Список литературы

1. *Верейтин А.Ю.* Способ диагностирования электромагнитных форсунок двигателей с впрыскиванием бензина: дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2010. 143 с.

2. *Овчинников Г.В.* Влияние загрязнения и износа элементов электромагнитных форсунок на характеристики автомобильного бензинового двигателя: дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2009. 144 с.

3. *Цэдэшиев Ц.В.* О необходимости промывки и очистки форсунок инжекторной системы питания // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК: материалы региональной студенческой научно-практической конференции: в 2 т. Т. 2. Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2016. С. 253–258.

4. *Григорьев М.В., Далидович А.А.* Диагностика и обслуживание электромагнитных форсунок бензиновых ДВС: методические указания к лабораторной работе по курсам «Эксплуатация наземных транспортно-технологических средств», «Основы диагностики наземных транспортно-технологических средств». М.: МАДИ, 2018. 52 с.

5. *Зеленин В.А., Суханов С.А.* Методика предварительного диагностирования работоспособности бензиновых ДВС инжекторного типа // Научный вестник НГГТИ. 2017. Т. 3. С. 33–36.

6. *Березюков Д.С.* Разработка метода безразборного диагностирования электромагнитных форсунок ДВС с впрыском легкого топлива и исследование изменений их рабочих показателей: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2012. 131 с.

7. *Киселев Д.В., Шурин С.А.* Промывка форсунок и топливной рейки бензинового двигателя без демонтажа и применения специализированной аппаратуры // Научные проблемы материально-технического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации: сборник научных трудов. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2017. С. 221–226.

8. *Красота М.В., Шепеленко И.В., Матвиенко А.А., Аль Соодани Салем М. Муташаир.* Исследование влияния загрязнений электромагнитных форсунок на параметры бензиновых двигателей // Конструирование, производство и эксплуатация сельскохозяйственных машин. 2013. Т. 43 Ч. 2. С. 125–133.

9. *Патрин А.Н., Нечаев В.В., Меркушов Ю.Н.* Функциональное диагностирование электромагнитных форсунок в впрысковых ДВС с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. 2007. № 8. С. 29–31.

10. *Khlopkov S., Danilov I., Khodyakov A., Danilov S., Leonteva L.* Influence of electromagnetic atomizers' technical condition on power and ecological indicators of gasoline I.C.E. in operation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1687. 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012021>

11. *Гаврилов К.Л.* Профессиональная диагностика ДВС, систем: топливоснабжения, зажигания, энерго-

снабжения, пуска автомобилей, дорожно-строительных машин и сельскохозяйственных машин. 4-е изд. Сергиев Посад: Российский центр сельскохозяйственно-го консультирования, 2017. 720 с.

12. *Бакайкин Д.Д.* Диагностирование электромагнитных форсунок бензиновых двигателей автомобилей, эксплуатируемых в сельском хозяйстве: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2013. 132 с.

13. *Бакайкин Д.Д., Гриценко А.В., Абросимов Д.А.* Диагностирование электромагнитных форсунок ДВС на тестовых режимах // АПК России. 2015. Т. 72. № 1. С. 16–18.

14. *Гусаков С.В., Савастенко А.А.* Испытания электромагнитных форсунок систем распределенного впрыскивания бензина: методическое пособие. М.: РУДН, 2005. 16 с.

15. *Денисов А.С., Басков В.Н.* Основы методики инженерного эксперимента: учебное пособие. Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2012. 84 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006532338> (дата обращения: 25.07.2021).

16. *Бараз В.Р., Пегашкин В.Ф.* Использование MS EXCEL для анализа статистических данных. 2-е изд., перераб. и доп. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014. 181 с.

References

1. Vereyutin AYu. *A method for diagnosing electromagnetic nozzles of engines with gasoline injection* (dissertation of a Candidate of Technical Sciences). Ryzan; 2010. (In Russ.)

2. Ovchinnikov GV. *Influence of pollution and wear of elements of electromagnetic nozzles on the characteristics of an automobile gasoline engine* (dissertation of a Candidate of Technical Sciences). Vladimir; 2009. (In Russ.)

3. Tsedashiev TsV. On the necessity of flushing and cleaning the nozzles of the injection power supply system. *Scientific Research of Students in Solving Urgent Problems of the Agro-Industrial Complex: Materials of the Regional Student Scientific-Practical Conference* (vol. 2, p. 253–258). Irkutsk: Irkutsk State University of Agriculture; 2016. (In Russ.)

4. Grigoriev MV, Dalidovich AA. *Diagnostics and maintenance of electromagnetic nozzles of gasoline internal combustion engines: guidelines for laboratory work on the courses "Operation of Ground Transport and Technological Means," "Fundamentals of Diagnostics of Ground Transport and Technological Means."* Moscow: MADI; 2018. (In Russ.)

5. Zelenin VA, Suhanov SA. Method for preliminary diagnosing performance gasoline engine type injector. *Scientific Bulletin of the Nevinnomysk State Humanitarian and Technical University*. 2017;3:33–36. (In Russ.)

6. Berezyukov DS. *Development of a method for in-place diagnostics of electromagnetic nozzles of internal*

combustion engines with light fuel injection and research of changes in their performance (dissertation of a Candidate of Technical Sciences). Volgograd; 2012. (In Russ.)

7. Kiselev DV, Shurin SA. Flushing of nozzles and fuel rail of a gasoline engine without dismantling and using specialized equipment. *Scientific Problems of Material and Technical Support of the Armed Forces of the Russian Federation: Collection of Scientific Papers*. St Petersburg: Polytechnic University Publ.; 2017. p. 221–226. (In Russ.)

8. Beauty MV, Shepelenko IV, Matvienko AA, Al Soodani Salem M. Mutashair. Study of the influence of contamination of electromagnetic injectors on the parameters of gasoline engines. *Design, Production and Operation of Agricultural Machinery*. 2013;43(part 2);125–133. (In Russ.)

9. Patrín AN, Nechaev VV, Merkushev YuN. Functional diagnostics of electromagnetic injectors in sparkignited internal combustion engines. *Automotive Industry*. 2007;(8):29–31. (In Russ.)

10. Khlopkov S, Danilov I, Khodyakov A, Danilov S, Leonteva L. Influence of electromagnetic atomizers' technical condition on power and ecological indicators of gasoline I.C.E. in operation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1687:012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012021>

11. Gavrilov KL. *Professional diagnostics of internal combustion engines, systems: fuel supply, ignition, power supply, starting cars, road-building machines and agricultural machines*. 4th ed. Sergiyev Posad: Russian Center for Agricultural Consulting; 2017. (In Russ.)

12. Bakaykin DD. Diagnostics of electromagnetic nozzles of gasoline engines of automobiles operated in agriculture (Dissertation of a Candidate of Technical Sciences). Chelyabinsk; 2013. (In Russ.)

13. Bakaykin DD, Gritsenko AV, Abrosimov DA. Diagnostics of electromagnetic injectors of internal combustion engines in test modes. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2015;72(1):16–18. (In Russ.)

14. Gusakov SV, Savastenko AA. Tests of electromagnetic injectors of gasoline distributed injection systems: toolkit. Moscow: RUDN University; 2005. (In Russ.)

15. Denisov AS, Baskov VN. *Fundamentals of engineering experiment methodology: textbook*. Saratov: Saratov State Technical University; 2012. (In Russ.) Available from: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006532338> (accessed: 25.07.2021).

16. Baraz VR, Pegashkin VF. *Using MS EXCEL for the analysis of statistical data*. 2nd ed., rev. and add. Nizhny Tagil: Nizhny Tagil Technological Institute (branch) Ural Federal University; 2014. (In Russ.)

Сведения об авторах

Ходяков Александр Андреевич, кандидат химических наук, доцент департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0001-9391-2890, Scopus Author ID: 6701565417, eLIBRARY SPIN-код: 4780-1919. E-mail: khodyakov-aa@rudn.ru

Хлопков Сергей Валентинович, кандидат технических наук, доцент департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0001-9536-7558, Scopus Author ID: 57212109092, eLIBRARY SPIN-код: 8997-3305. E-mail: khlopkov-sv@rudn.ru

Басова Влада Валерьевна, магистрант департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. E-mail: 1032202133@rudn.ru

About the authors

Alexander A. Khodyakov, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9391-2890, Scopus Author ID: 6701565417, eLIBRARY SPIN-code: 4780-1919. E-mail: khodyakov-aa@rudn.ru

Sergey V. Khlopkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9536-7558, Scopus Author ID: 57212109092, eLIBRARY SPIN-code: 8997-3305. E-mail: khlopkov-sv@rudn.ru

Vlada V. Basova, master's student, Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. E-mail: 1032202133@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-47-56
УДК 621.97.06

Научная статья / Research article

Устранение причин трещинообразования в ползуне мощного кривошипного штамповочного пресса

А.В. Корнилова^a  , Чжо Зяяр^b 

^aНациональный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Российская Федерация

^bМосковский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация
 anna44@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 5 ноября 2021 г.
Доработана: 22 февраля 2022 г.
Принята к публикации: 28 февраля 2022 г.

Ключевые слова:

кривошипный пресс, ползун, усталость
металла, трещины, ребра жесткости

Аннотация. Известно, что при длительной эксплуатации кривошипных машин для холодной листовой штамповки, заключающейся в циклическом нагружении конструкции механическими напряжениями, происходит усталостная деградация металла, приводящая к возникновению и росту трещин. Тем не менее основной тенденцией современных российских подходов к модернизации парка кузнечно-прессовых машин является стремление сохранить крупногабаритные металлоемкие детали штамповочных прессов при замене системы управления и узлов гидравлики и/или пневматики дополнительных исполнительных механизмов. Как показала практика, такой подход экономически и технологически оправдан. Страны, у которых нет мощностей для изготовления штамповочных машин собственных марок, покупают оборудование за рубежом (в том числе в России), как правило, из экономических соображений на рынке вторичных продаж после длительного периода эксплуатации. В этом случае требуется грамотная предпродажная подготовка, чтобы избежать аварийных ситуаций и отказов оборудования после его монтажа на предприятии-покупателе. Обеспечение долговечности кривошипных штамповочных машин после периода длительной эксплуатации – актуальная задача как для промышленности развивающихся стран, так и для российской. На примере мощного кривошипного листоштамповочного пресса, в процессе предпродажной подготовки которого выявлены трещины в ползуне, показан способ устранения причин трещинообразования при его дальнейшей эксплуатации.

Для цитирования

Корнилова А.В., Чжо Зяяр. Устранение причин трещинообразования в ползуне мощного кривошипного штамповочного пресса // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 47–56. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-47-56>



Elimination of causes of crack formation in the slider of a powerful crank forming press

Anna V. Kornilova^a  , Kyaw Zaya^b 

^aMoscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

^bMoscow State Technological University “STANKIN,” Moscow, Russian Federation

 anna44@yandex.ru

Article history

Received: November 5, 2021

Revised: February 22, 2022

Accepted: February 28, 2022

Keywords:

crank press, slider, metal fatigue cracks, stiffeners

Abstract. It is known that during long-term operation of crank machines for cold sheet stamping, which consists in cyclic loading of the structure with mechanical stresses, fatigue degradation of the metal occurs, leading to the occurrence and growth of cracks. Nevertheless, the main trend of modern Russian approaches to modernizing the park of forging and pressing machines is the desire to preserve large metal-consuming parts of stamping presses when replacing the control system and hydraulic and/or pneumatic components of additional actuators. Practice has shown that such approach is economically and technologically justified. For countries that do not have the capacity to manufacture stamping machines of their own brands, there is a need to purchase equipment abroad (including Russia), usually for economic reasons in the secondary market after a long period of operation. In this case, competent pre-sale preparation is required in order to avoid emergencies and equipment failures after its installation at the purchasing enterprise. Ensuring the durability of crank stamping machines after a period of long-term operation is an urgent task, both for the industry of developing countries and for the Russian one. Using the example of a powerful crank stamping press, during the pre-sale preparation of which cracks in the slider were revealed, a way to eliminate the causes of cracking during its further operation is shown.

For citation

Kornilova AV, Kyaw Zaya. Elimination of causes of crack formation in the slider of a powerful crank forming press. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):47–56. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-47-56>

Введение

Проблема обеспечения надежной работы оборудования машиностроительных производств в настоящее время становится все более актуальной, так как старение оборудования во многих отраслях промышленности значительно опережает темпы технического перевооружения¹. Коснулась она и отрасли производства кузнечно-прессового оборудования [1]. Основной причиной выхода из строя стареющего оборудования практически любого назначения являются усталостные трещины [2–4]. Существуют различные подходы к изучению этого вопроса, касающиеся как развития лабораторных исследований [5], так и привлечения сложного

математического аппарата к описанию явлений, происходящих при циклическом приложении механических напряжений к деталям оборудования при выполнении технологических операций [6]. Но решения пока нет.

Для мощных технологических машин развитие и рост усталостных трещин напрямую связан с промышленной безопасностью [7]. Известно, что при производстве большинства изделий военного назначения и народного потребления используются операции штамповки, которые производятся на кривошипных штамповочных прессах [8]. Технологии штамповки непрерывно развиваются [9]. Для внедрения новых технологий необходимы новые технологические машины. Однако в силу низких темпов технического перевооружения главной тенденцией является модернизация существующего оборудования. При модернизации парка кузнечно-прессовых машин,

¹ Возраст оборудования машиностроительного комплекса на примере отдельных предприятий отрасли. URL: <https://aftershock.news/?q=node/361989&full> (дата обращения: 25.12.2021).

в частности кривошипных штамповочных, стремясь сохранить крупногабаритные металлоемкие детали при замене системы управления и узлов гидравлики и/или пневматики дополнительных исполнительных механизмов. Такой подход в России экономически и технологически оправдан.

Для стран, у которых нет мощностей для изготовления штамповочных машин собственных марок, существует необходимость покупки оборудования за рубежом, как правило, из экономических соображений на рынке вторичных продаж после длительного периода эксплуатации. Это привело к образованию большого рынка вторичной продажи прессов, в том числе в Индию и страны Юго-Восточной Азии. Бывает, что к моменту продажи машина меняет третьего и более хозяев. В этом случае требуется грамотная предпродажная подготовка, чтобы избежать аварийных ситуаций и отказов оборудования после его монтажа на предприятии-покупателе. Обеспечение долговечности кривошипных штамповочных машин после периода длительной эксплуатации актуально как для промышленности развивающихся стран, так и для российской. Это требует подходов, основанных на математическом моделировании, методах неразрушающего контроля и экспериментальных исследованиях. Рассмотрим способы устранения причин трещинообразования в деталях

технологического оборудования на примере мощного кривошипного листоштамповочного пресса, в процессе предпродажной подготовки которого выявлены трещины в ползуне.

Объектом исследования стал пресс номинальной силой 800 тс (8 МН), массой 150 т, предназначенный для операций холодной листовой штамповки – вырубки/пробивки, резки, проколки, надрезки, обрезки, гибки, скручивания. Штамповка может производиться на двух позициях. Пресс (рис. 1) находился в интенсивной эксплуатации с 1989 г. Материал ползуна – сталь марки 1.1181 немецкого производства, которая является аналогом российской стали 35 [10]. Так как при обследовании ползуна пресса не представлялось возможным осуществить вырезку образцов для определения механических характеристик металла, то согласно [11] принималась величина предела прочности (временного сопротивления разрыву) 530 МПа. В процессе предпродажной подготовки выявлены трещины в ползуне и принято решение, что все выявленные дефекты будут исправлены в процессе монтажа на производственной площадке покупателя. На основе математического моделирования и экспериментальных исследований установлены причины трещинообразования, частично показанные в [12].

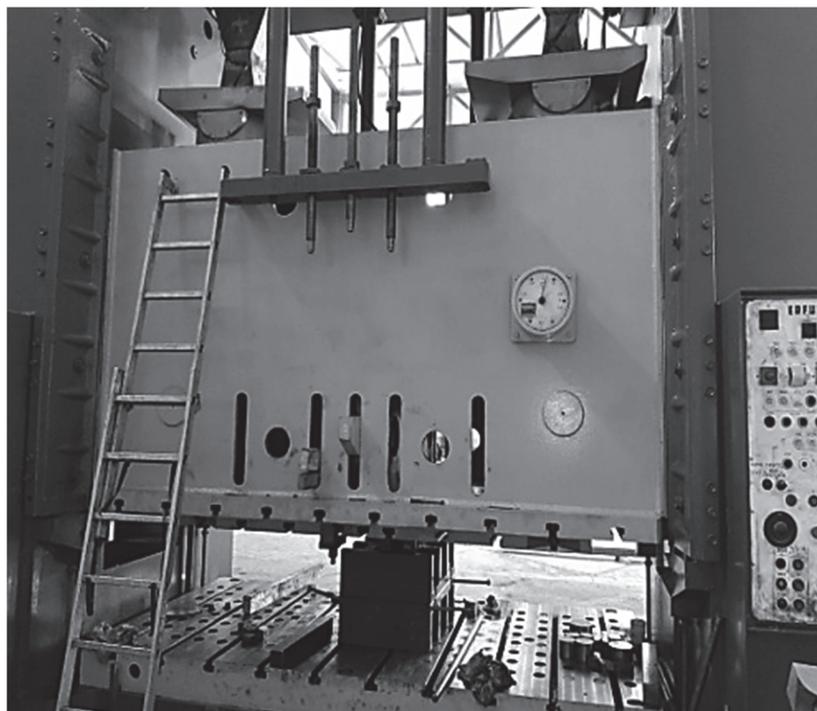


Рис. 1. Рабочая зона исследуемого пресса (фото Чжо Зяяр)
Figure 1. Working area of the studied press (photo by Kyaw Zaya)



Рис. 2. Трещины в ползуне, выявленные в процессе обследования (фото Чжо Заяр)
Figure 2. Cracks in the slider revealed during the examination (photo by Kyaw Zaya)

1. Моделирование напряженно-деформированного состояния ползуна для выявления причин трещинообразования

Для определения причин трещинообразования и разработки мероприятий по их устранению проведен вычислительный эксперимент. Создана трехмерная модель ползуна исследуемого пресса по натурным замерам на объекте со всеми изменениями, внесенными при эксплуатации пресса (рис. 3), то есть с параметрами, отличающимися от заданных чертежами.

Выполнены два варианта расчета: 1) силы на рабочей поверхности ползуна равны по величине и приложены симметрично относительно плоскости симметрии ползуна, перпендикулярной фронту пресса; 2) приложение сил на одну пози-

цию на рабочей поверхности ползуна в 2 раза больше силы, приложенной ко второй. Результаты расчета сведены в табл. 1.

Оценка напряженно-деформированного состояния ползуна производилась методом конечных элементов с помощью пакета прикладных программ SolidWorks с конечно-элементным анализом (МКЭ-FEA) [13; 14]. Расчет численным методом выявил, что неодинаковость приложения нагрузки на двух рабочих позициях привела к образованию трещин в сварном соединении рабочей поверхности ползуна за счет увеличения максимальных напряжений и смещения зоны их действия к сварному шву, где и сформировалась усталостная трещина (рис. 3–5).

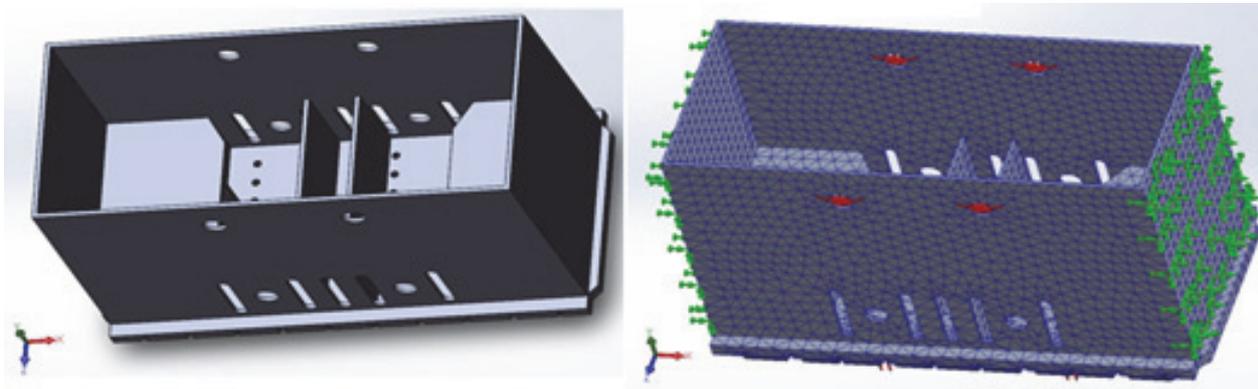


Рис. 3. Модель ползуна (существующий вариант)
Figure 3. Slider model (existing version)

Таблица 1

Результаты расчета ползуна (предпродажный вариант)

Вариант расчета	Величины в месте формирования усталостного дефекта					
	Эквивалентные напряжения, МПа	Осевые напряжения, МПа			Перемещения по линии действия технологической силы (ось Y), мм	Деформация
		X	Y	Z		
1	150	34	12	78	1,4	8×10^{-4}
2	200	67	20	95	2,1	$1,5 \times 10^{-3}$

Table 1

Slider calculation results (pre-sale option)

Calculation option	The values are indicated at the place of formation of the fatigue defect					
	Equivalent stresses, MPa	Axial stresses, MPa			Displacement along the line of action of technological force (axis Y), mm	Deformation
		X	Y	Z		
1	150	34	12	78	1.4	8×10^{-4}
2	200	67	20	95	2.1	1.5×10^{-3}

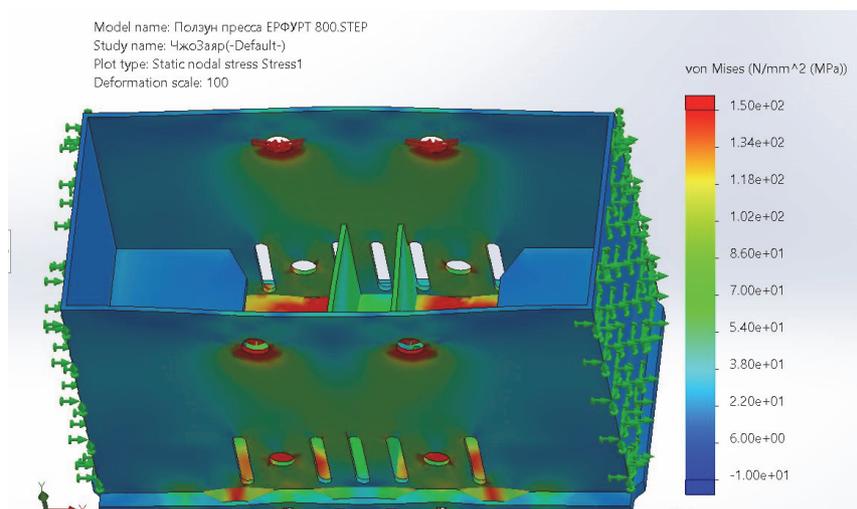


Рис. 4. Эквивалентные напряжения по IV теории прочности (Губера, Мизеса, Генки). Приложение равных технологических сил на двух позициях (распределенная нагрузка 15 МПа)

Figure 4. Equivalent stresses according to IV theory of strength (Huber, Mises, Genki). Application of equal technological forces in two positions (distributed load 15 MPa)

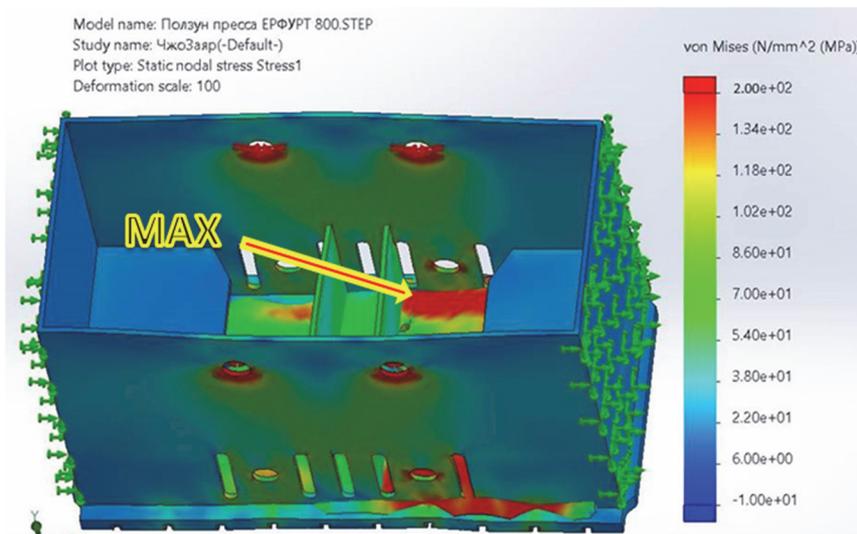


Рис. 5. Эквивалентные напряжения по IV теории прочности (Губера, Мизеса, Генки).

Приложение технологических сил на двух позициях различное по величине (распределенные нагрузки 10 и 20 МПа)

Figure 5. Equivalent stresses according to IV theory of strength (Huber, Mises, Genki). The application of technological forces in the two positions is different (distributed loads 10 and 20 MPa)

2. Моделирование напряженно-деформированного состояния ползуна с ребрами жесткости

Вопросам возникновения и роста дефектов при циклическом приложении механических напряжений в деталях конструкций различного назначения посвящены работы [15–17]. Показано, что наиболее эффективно сказывается на замедлении процесса формирования и роста усталостных дефектов снижение уровня напряжений. В [18] проведен подробный анализ возможных дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин, описаны возможные сценарии развития эллиптических, полуэллиптических и сквозных дефектов. Там же приведен разработанный авторами способ торможения трещин путем снижения технологических сил машины.

Но в рассматриваемой задаче данный подход оказался не применим. Покупателю важно было сохранить номинальную силу пресса и возможность одновременной штамповки на двух пози-

циях. Поэтому было принято решение после разделки и заварки образовавшихся усталостных трещин повысить местную жесткость путем установки ребер жесткости внутри ползуна исходя из конструктивных возможностей. Очевидно, что полностью устранить саму возможность приложения неодинаковых по величине сил на двух позициях двухпозиционного пресса невозможно даже при соблюдении всех технологических инструкций. Она может возникнуть из-за разнотолщинности материала (в том числе в пределах допуска), разных механических свойств заготовок на двух позициях и т. д. В связи с этим был проведен расчет напряженно-деформированного состояния ползуна с установленными ребрами жесткости по двум вариантам – силы на двух позициях одинаковые (вариант 3, рис. 6) и с разными силами, аналогично варианту 2 в расчете вышеприведенного предпродажного варианта (вариант 4). Данные расчета сведены в табл. 2.

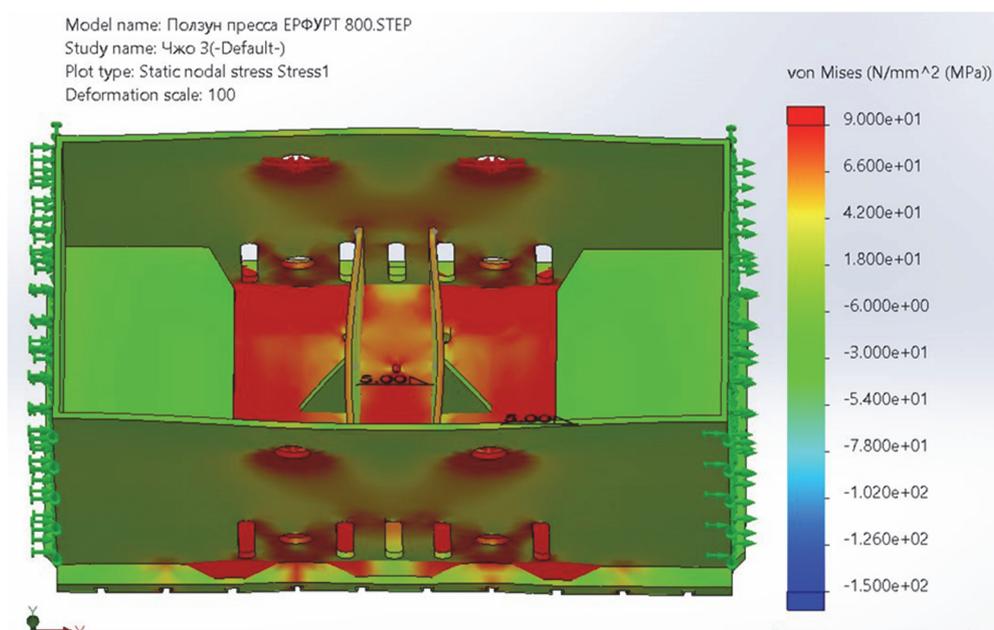


Рис. 6. Эквивалентные напряжения по IV теории прочности (Губера, Мизеса, Генки). Вариант расчета с установленными ребрами жесткости. Приложение равных технологических сил на двух позициях (распределенная нагрузка 15 МПа)
Figure 6. Equivalent stresses according to IV theory of strength (Huber, Mises, Genki). Calculation option with stiffeners installed. Application of equal technological forces in two positions (distributed load 15 MPa)

Таблица 2

Результаты расчета ползуна с установленными ребрами жесткости

Вариант расчета	Величины в месте формирования усталостного дефекта					Перемещения по линии действия технологической силы (ось Y), мм	Деформация
	Эквивалентные напряжения, МПа	Осевые напряжения, МПа					
		X	Y	Z			
3	90	6	18	42	1,14	5×10^{-4}	
4	110	12	30	51	1,72	$9,4 \times 10^{-4}$	

Table 2

Calculation option	Results of calculating a slider with stiffeners installed					
	The values are indicated at the place of formation of the fatigue defect					
	Equivalent stresses, MPa	Axial stresses, MPa			Displacement along the line of action of technological force (axis Y), mm	Deformation
		X	Y	Z		
3	90	6	18	42	1.14	5×10^{-4}
4	110	12	30	51	1.72	9.4×10^{-4}

3. Циклическая долговечность ползуна при различных вариантах нагружения

Далее была рассчитана циклическая прочность (долговечность) ползуна исследуемого пресса. Примем, что напряжения меняются по синусоидальному закону [20] при коэффициенте асимметрии 0 (пульсирующие циклы) с условием соблюдения всех правил обслуживания и эксплуатации машины. Значение коэффициента чувствительности материала к асимметрии цикла ψ , согласно действующему ГОСТу 25.504-82²,

$$\psi = 0,02 + 2 \times 10^{-4} \sigma_{\text{в}}. \quad (1)$$

В рассматриваемом случае для стали марки 1.1181 по (1) $\psi = 0,13$. Приведенные к симметричным циклам напряжения (с коэффициентом асимметрии -1) определяются следующим образом:

$$\sigma_{\text{апр}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{2} (1 + \psi). \quad (2)$$

Расчетные данные $\sigma_{\text{апр}}$ для четырех вариантов расчета напряженно-деформированного состояния ползуна приведены в табл. 3. Принимаем согласно ГОСТ 25.504-82 для коэффициента асимметрии цикла -1 величину предела выносливости материала ползуна:

$$\sigma_{-1} = (0,55 - 10^{-4} \sigma_{\text{в}}) \sigma_{\text{в}}. \quad (3)$$

По (3) $\sigma_{-1} = 263$ МПа. Далее определяем коэффициенты, математически описывающие снижение предела выносливости:

– масштабный коэффициент (фактор) принимается по ГОСТ 25.504-82 – $\varepsilon_{\text{мф}} = 0,5$;

² ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М.: Издательство стандартов, 1982. 55 с.

– коэффициент, зависящий от качества обработки поверхности по [19],

$$\varepsilon_{\text{мо}} = 1 - 0,22 \log R_z \left(\log \frac{\sigma_{\text{в}}}{20} - 1 \right). \quad (4)$$

Параметр качества обработки поверхности принимается $R_z = 100$. По (4) получаем 0,81:

– коэффициент, зависящий от влияния сварки, согласно ГОСТ 25.504-82, – $\varepsilon_{\text{св}} = 0,6$;

– принимается допущение, что материал абсолютно чувствителен к надразам.

Предел выносливости ползуна $\sigma_{-1п}$ с учетом всех снижающих факторов составит 64 МПа. Число циклов до разрушения по кривой А. Веллера, построенной в полулогарифмических координатах, определяется согласно [19] следующим образом:

$$N = N_0 10^{\frac{\sigma_{-1п} - \sigma_{\text{апр}}}{k}}, \quad (5)$$

где N_0 – базовое число циклов (принимается 10^7); k – параметр, равный тангенсу наклона ветви многоциклового усталости кривой А. Веллера в полулогарифмических координатах (53 МПа).

Полученные значения долговечности приведены в табл. 3. Также рассчитано число циклов формирования усталостного дефекта. Расчет велся по гипотезе накопления усталостной повреждаемости Мэнсона [19]. Мэнсон предположил, что усталостный процесс нужно подразделить на основные фазы – зарождения трещины и развития трещины до критической величины (соответствующей моменту разрушения). Это позволяет оценить длительность каждой фазы отдельно. В работе Мэнсона [20] для оценки фазы развития трещины применены следующие выражения:

$$N_p = PN^p, \quad (6)$$

где N_p – число циклов распространения трещины после ее образования (число циклов роста дефекта);

N – полное число циклов до разрушения; P и p – экспериментально определенные коэффициенты.

Число циклов зарождения (формирования) трещины:

$$N' = N - N^p. \quad (7)$$

По многочисленным экспериментам Мэнсоном установлено, что $p = 0,6$, $P = 14$ за всех типов

стали. Следовательно, согласно (6) и (7), можно записать:

$$N' = N - 14N^{0,6}. \quad (8)$$

Анализ расчетных данных из табл. 3 показал, что неодинаковое приложение нагрузки на рабочих позициях в 3,5 раза ускоряет формирование усталостных дефектов.

Таблица 3

Расчетные долговечности (число циклов нагружения)

1	Максимальные эквивалентные напряжения цикла (расчет МКЭ), МПа	150 Вариант 1	200 Вариант 2	90 Вариант 3	110 Вариант 4
2	Напряжения, приведенные к симметричным циклам по (2), МПа	85	113	51	62
3	Число циклов до разрушения по (5)	4×10^6	$1,2 \times 10^6$	∞ так как $\sigma_{-1п} > \sigma_{апр}$	∞ так как $\sigma_{-1п} > \sigma_{апр}$
4	Число циклов формирования дефекта по билинейному правилу Мэнсона по (8)	$3,9 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6$	∞	∞

Table 3

Design life (number of loading cycles)

1	Maximum equivalent cycle stresses (calculation of FEM), МПа	150 Option 1	200 Option 2	90 Option 3	110 Option 4
2	Stresses reduced to symmetrical cycles according to (2), МПа	85	113	51	62
3	Number of cycles before failure according to (5)	4×10^6	1.2×10^6	∞ because $\sigma_{-1sl} > \sigma_{ared}$	∞ because $\sigma_{-1п} > \sigma_{ared}$
4	The number of defect formation cycles according to the Manson bilinear rule according to (8)	3.9×10^6	1.1×10^6	∞	∞

Заключение

На основании проведенного инженерного исследования можно заключить следующее:

– основной причиной трещинообразования в ползуне мощного кривошипного штамповочного прессы является несимметричное относительно плоскости симметрии ползуна, перпендикулярной фронту прессы, приложение технологической силы (разные технологические силы на двух штамповочных позициях). Неравномерное приложение нагрузки на рабочих позициях в 3,5 раза ускоряет формирование усталостных дефектов;

– установка ребер жесткости внутри ползуна позволяет вывести ползун из зоны трещинообразования даже при несимметричном приложении нагрузки на штамповочных позициях, что доказывает эффективность метода повышения местной жесткости конструкции с трещиной;

– предложенное конструктивное решение позволяет минимизировать изгибные напряжения в зоне сварки у вновь разрабатываемых кузнечно-прессовых машин этого класса.

Список литературы

1. Трухин Ю.Г., Чукардин В.И. О проблемах развития отрасли производства кузнечно-прессового оборудования в России // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 2. С. 44–48.
2. Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Burov A.E., Aniskovich E.V., Cherniaev A.P., Khalimanovich V.I. Experimental study of the strength and durability of metal-composite high-pressure tanks // *Inorganic Materials*. 2020. Vol. 56. No. 15. Pp. 1478–1484. <https://doi.org/10.1134/S0020168520150108>
3. Moskvichev V.V., Chaban E.A. Analysis of propagation of fatigue cracks in crane girders // *Inorga-*

nic Materials. 2019. Vol. 55. No. 15. Pp. 1496–1502. <https://doi.org/10.1134/S0020168519150123>

4. Gadolina I.V., Makhutov N.A., Erpalov A.V. Varied approaches to loading assessment in fatigue studies // *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 144. 106035. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106035>

5. Махутов Н.А. Развитие лабораторных исследований и диагностики материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2022. Т. 88. № 1–1. С. 5–13. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-1-5-13>

6. Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка вероятности усталостного разрушения с использованием байесовских процедур // *Деформация и разрушение материалов*. 2021. № 12. С. 2–10.

7. Makhutov N.A., Nadein V.A., Gadenin M.M., Reznikov D.O. Risk and industrial safety // *Reliability: Theory & Applications*. 2022. Vol. 17. No. 3 (66). Pp. 138–143. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-138-143>

8. Бурдуковский В.Г., Инатович Ю.В. Оборудование кузнечно-штамповочных цехов. Кривошипные машины. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 168 с.

9. Romyantsev M.I., Tulupov O.N. Further developments in simulation of metal forming processes // *CIS Iron and Steel Review*. 2018. Vol. 16. Pp. 21–24. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2018.02.04>

10. Международный транслятор современных сталей и сплавов. Сортамент: в 4 т. Т. IV. Сортамент черных металлов. Кн. 2 / под ред. М.С. Блантера, В.С. Кершенбаума. М.: Союз научных инженерных обществ, 1995. 300 с. (Серия: Международная инженерная энциклопедия).

11. Драгунов Ю.Г., Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Дегтярев А.Ф., Жаров В.В., Колосков М.М., Орлов А.С., Скоробогатых В.Н. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. М., 2014. 1216 с.

12. Корнилова А.В., Чжо Зяяр. Причины трещинообразования в ползуне прессы ERFURT PKZZ I 800 // *Инженерные системы – 2021: труды международной конференции*. М.: РУДН, 2021. С. 42–47.

13. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.: ДМК Пресс. 2010. 646 с.

14. James D.B. Engineering design and graphics with SOLIDWORKS 2016. Boston: Pearson, 2016. 829 p.

15. Kornilova A.V., Kyaw Zaya, Toptygin K.P. Determination of critical parameters of defects in aircraft skin by fracture mechanics criteria method // *Advances in the Astronautical Sciences*. Magnitogorsk, 2021. Pp. 605–612.

16. Kornilova A.V., Zaya K., Paing T., Dobrolyubova M.F. Properties of metallic materials near the edges of fatigue crack // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1687. No. 1. 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012028>

17. Корнилова А.В., Идармачев И.М., Чжо Зяяр, Паинг Т. Практические аспекты оценки повреждае-

мость в условиях многоциклового усталости: монография. М.: Перо, 2020. 115 с.

18. Корнилова А.В., Чжо Зяяр. Определение допустимых параметров дефектов в базовых деталях кузнечно-прессовых машин // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 4. С. 308–315. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315>

19. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

20. Manson S.S. Interfaces between fatigue, creep, and fracture // *International Journal of Fracture Mechanics*. 1966. Vol. 2. No. 327. Pp. 127–130. <https://doi.org/10.1007/BF00188825>

References

1. Trukhin YuG, Chukardin VI. On the problems of development of the industry of production of forging and pressing equipment in Russia. *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*. 2021;(2):44–48. (In Russ.)

2. Lepikhin AM, Moskvichev VV, Burov AE, Aniskovich EV, Cherniaev AP, Khalimanovich VI. Experimental study of the strength and durability of metal-composite high-pressure tanks. *Inorganic Materials*. 2020;56(15):1478–1484. <https://doi.org/10.1134/S0020168520150108>

3. Moskvichev VV, Chaban EA. Analysis of propagation of fatigue cracks in crane girders. *Inorganic Materials*. 2019;55(15):1496–1502. <https://doi.org/10.1134/S0020168519150123>

4. Gadolina IV, Makhutov NA, Erpalov AV. Varied approaches to loading assessment in fatigue studies. *International Journal of Fatigue*. 2021;144:106035. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106035>

5. Makhutov NA. Development of laboratory research and diagnostics of materials. *Factory Laboratory. Material Diagnostics*. 2022;88(1–1):5–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-1-5-13>

6. Makhutov NA, Reznikov DO. Estimation of the fatigue failure probability using Bayesian procedures. *Deformation and Destruction of Materials*. 2021;(12):2–10. (In Russ.)

7. Makhutov NA, Nadein VA, Gadenin MM, Reznikov DO. Risk and industrial safety. *Reliability: Theory & Applications*. 2022;17(3(66)):138–143. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-138-143>

8. Burdukovsky VG, Inatovich YuV. *Equipment for forging and stamping shops. Crank machines*. Yekaterinburg: Izd-vo Uralskogo Universiteta Publ.; 2018. (In Russ.)

9. Romyantsev MI, Tulupov ON. Further developments in simulation of metal forming processes. *CIS Iron and Steel Review*. 2018;16:21–24. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2018.02.04>

10. Blanter MS, Kershenbaum VYa. (eds.) *International translator of modern steels and alloys. Assortment. Vol. 4. Range of ferrous metals* (book 2). Moscow: Union of Scientific and Engineering Societies; 1995.
11. Dragunov YuG, Zubchenko AS, Kashirskii YuV, Degtyarev AF, Zharov VV, Koloskov MM, Orlov AS, Skorobogatykh VN. *Brand of steels and alloys* (Yu.G. Dragunov, A.S. Zubchenko, eds.). 4th ed., revis. and add. Moscow; 2014. (In Russ.)
12. Kornilova AV, Kyaw Zaya. Reasons for cracking in the slider of the ERFURT PKZZ I 800 press. *Engineering Systems – 2021: Proceedings of the International Conference*. Moscow: RUDN University; 2021. p. 42–47. (In Russ.)
13. Alyamovsky AA. *Engineering Calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press; 2010. (In Russ.)
14. James DB. *Engineering Design and Graphics with SOLIDWORKS 2016*. Boston: Pearson; 2016.
15. Kornilova AV, Kyaw Zaya, Toptygin KP. Determination of critical parameters of defects in aircraft skin by fracture mechanics criteria method. *Advances in the Astronautical Sciences*. Magnitogorsk; 2021. p. 605–612.
16. Kornilova A, Kyaw Zaya, Paing T, Dobrolyubova MF. Properties of metallic materials near the edges of fatigue crack. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1687(1):012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012028>
17. Kornilova AV, Idarmachev I, Kyaw Zaya, Paing T. *Practical aspects of damage assessment under high-cycle fatigue conditions*. Moscow: Pero Publ.; 2020. (In Russ.)
18. Kornilova AV, Kyaw Zaya. Definition of acceptable parameters of defects in basic details of forging and pressmachines. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(4):308–315. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315>
19. Kogaev VP. *Strength calculations at variable voltages in time*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1993. (In Russ.)
20. Manson SS. Interfaces between fatigue, creep, and fracture. *International Journal of Fracture Mechanic*. 1966; 2(327):127–130. <https://doi.org/10.1007/BF00188825>

Сведения об авторах

Корнилова Анна Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры испытания сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26. ORCID: 0000-0001-5569-9320, Scopus AuthorID: 7004499009, Researcher ID: U-3353-2017, eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240. E-mail: anna44@yandex.ru

Чжоу Заяр, аспирант, кафедра композиционных материалов, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский пер., д. 1. ORCID: 0000-0003-0131-1399, Scopus AuthorID: 56416430100. E-mail: k.kyawzaya@yandex.ru

About the authors

Anna V. Kornilova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Testing of Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-5569-9320, Scopus Author ID: 7004499009, Researcher ID: U-3353-2017, eLIBRARY SPIN-code: 6569-6240. E-mail: anna44@yandex.ru

Kyaw Zaya, postgraduate, Department of Composite Materials, Moscow State Technological University “STANKIN,” 1 Vadkovskii Pereulok, Moscow, 127055, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-0131-1399, Scopus Author ID: 56416430100. E-mail: k.kyawzaya@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-57-64
УДК 669.2

Научная статья / Research article

Модифицирование медных сплавов ультрадисперсными порошками

М.Ю. Малькова^a  , А.Н. Задиранов^b , И.Н. Герасимова^b , Т.Г. Грушева^b 

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bАкадемия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Российская Федерация

✉ malkova-myu@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 27 ноября 2021 г.

Доработана: 14 февраля 2022 г.

Принята к публикации: 22 февраля 2022 г.

Ключевые слова:

бронзы, ультрадисперсные порошки, УДП, механические свойства, модифицирование, структура

Аннотация. Модифицирование металлических расплавов механохимически активированными ультрадисперсными порошками (УДП) позволяет получать сплавы черных и цветных металлов с принципиально новыми эксплуатационными свойствами за счет изменения структуры металлических сплавов. Цели исследования – проанализировать эффективность процесса модифицирования медных сплавов ультрадисперсными порошками и разработать специальное устройство для введения модификатора в расплав. Процесс модифицирования расплавов алюминиевой, кремниевой и оловянной бронз механохимически активированными УДП природного графита, оксидов кремния и алюминия фракцией – 100+0 мкм в концентрации 0,2–0,25 % изучен экспериментальным путем. Показано, что модифицирование вышеназванными порошками расплавов бронз отражается на микроструктуре сплавов, интенсивно измельчая ее по сравнению с исходной структурой. Установлено, что уменьшение размеров дендритной ячейки по сравнению с исходным сплавом достигает 25 %, а микрозерна – 230 %. Измельчение зерна приводит к повышению механических свойств медных сплавов, таких как твердость по Бринеллю НВ, предел прочности на растяжение σ_B , относительное удлинение δ . Для более эффективного осуществления процесса модифицирования металлических расплавов ультрадисперсными порошками разработана оригинальная конструкция устройства для ввода модификаторов в расплав, отличающаяся простотой и экономичностью исполнения.

Для цитирования

Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., Герасимова И.Н., Грушева Т.Г. Модифицирование медных сплавов ультрадисперсными порошками // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 57–64. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-57-64>



Modification of copper alloys with ultrafine powders

Marianna Yu. Malkova^a✉, Alexander N. Zadiranov^b, Irina N. Gerasimova^b, Tatiana G. Grusheva^b

^aPeoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

^bState Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

✉ malkova-myu@rudn.ru

Article history

Received: November 27, 2021

Revised: February 14, 2022

Accepted: February 22, 2022

Keywords:

copper bronzes, ultrafine powders, UDP, mechanical properties, modification, structure

Abstract. Modification of metal melts by mechanochemically activated ultrafine powders (UDP) makes it possible to obtain ferrous and non-ferrous metal alloys with fundamentally new performance properties due to changes in the structure of metal alloys. The purposes of this work were to analyse the efficiency of the process of modifying copper alloys with ultrafine powders and to develop a special device for introducing a modifier into the melt. Experimental studies of the process of modifying melts of aluminum, silicon and tin bronze with mechanochemically activated UDP of natural graphite, as well as silicon and aluminum oxides with a fraction of $-100+0$ microns in a concentration of 0.2–0.25 % were carried out. It is shown that the modification of bronze melts by the above-mentioned powders affects the microstructure of alloys, intensively grinding it in comparison with the initial structure. It was found that the reduction in the size of the dendritic cell in comparison with the initial alloy reaches 25%, and the micrograin – 230%. Grain grinding leads to an increase in the mechanical properties of copper alloys, such as Brinell hardness HB, tensile strength σ_b , elongation δ . For more efficient implementation of the process of modifying metal melts with ultrafine powders, an original design of a device for introducing modifiers into the melt has been developed, characterized by simplicity and cost-effectiveness of execution.

For citation

Malkova MYu, Zadiranov AN, Gerasimova IN, Grusheva TG. Modification of copper alloys with ultrafine powders. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):57–64. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-57-64>

Введение

Среди различных способов, направленных на улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств металлических сплавов, все большее значение приобретает модифицирование металлических расплавов механохимически активированными ультрадисперсными порошками (УДП) [1–4]. Модифицированные таким образом сталь [5–6] и чугун [7–10], алюминиевые [11–15] и медные сплавы [16] приобретают уникальные, ранее никогда не проявлявшиеся свойства.

Цели работы – изучение эффективности процесса модифицирования ультрадисперсными порошками сплавов на основе меди (бронза БрА7, БрКЗМц1 и БрО5Ц5С5) и разработка специального устройства для введения модификатора в расплав.

Методика проведения экспериментов

Объектами исследования стали расплавы алюминиевой, кремниевой и оловянной бронзы, химический состав которых представлен в

табл. 1 и 2¹, и их модификаторы (УДП природного графита, а также оксидов алюминия и кремния фракцией $-100+0$ мкм). Расплавы готовились переплавом стружки на лабораторной плавильной установке с графитовым тиглем емкостью 400 см³.

Ввод ультрадисперсных порошков в металлический расплав осуществляют различными методами. Связано это с тем, что при жидкофазном методе модифицирования прямое введение УДП в расплав приводит к компактированию частиц, их пылевывосу и интенсивному окислению при всплывании на поверхность расплава [17]. Поэтому перед введением в расплав проводят сложную и дорогостоящую подготовку порошков. Порошки предварительно прессуют в брикеты либо покрывают их поверхность металлическими пленками (плакирование, напыление, наплавка) [18].

¹ ГОСТ 18175–78. Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением. М.: Издательство стандартов, 1978; ГОСТ 613–79. Бронзы оловянные литейные. М.: Издательство стандартов, 1979.

В.В. Сенкус и колл.² предлагают способ модифицирования металлов и сплавов смесью УДП, содержащей оксид алюминия Al_2O_3 , карбидоподобную фазу $FeAlC_n$ и гидроксид алюминия $Al(OH)_3$. При этом измельчение смеси произво-

дят в постоянном магнитном поле напряженностью 0,1–0,5 Тс, размер частиц УДП составляет 10^2 – 10^3 нм. Недостатком способа является аппаратная сложность его реализации и высокая энергоёмкость.

Таблица 1

Химический состав бронз БрА7 и БрК3Мц1, %

Марка	Al	Sn	Zn	Fe	Si	Pb	Cu	Mn	Примеси
БрА7	6–8	0,1	0,5	0,5	0,1	0,03	90,9–94	0,5	1,6
БрК3Мц	–	0,25	0,5	0,3	2,75–3,5	0,03	94–96,3	1–1,5	1,1

Table 1

Chemical composition of bronzes BrA7 and BrK3Mц1, %

Grade	Al	Sn	Zn	Fe	Si	Pb	Cu	Mn	Impurities
BrA7	6–8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.03	90.9–94	0.5	1.6
BrK3Mц1	–	0.25	0.5	0.3	2.75–3.5	0.03	94–96.3	1–1.5	1.1

Таблица 2

Химический состав бронзы Бр05Ц5С5, %

Марка	Al	Sn	Zn	Fe	Si	Pb	Cu	P	Примеси
Бр05Ц5С5	0,05	4–6	4–6	0,4	0,05	4–6	80,7–88	0,1	1,3

Table 2

Chemical composition of bronze Br05C5C5, %

Grade	Al	Sn	Zn	Fe	Si	Pb	Cu	P	Impurities
Br05C5C5	0.05	4–6	4–6	0.4	0.05	4–6	80.7–88	0.1	1.3

В этой связи было разработано устройство для модифицирования металлических расплавов путем ввода УДП непосредственно в расплав. Концентрация УДП составляла 0,2–0,25 % от веса расплава. Устройство (рис. 1) представляет собой графитовый разборный контейнер (1) глобулярной формы диаметром 12–15 мм, толщина стенки 2–3 мм³. При подготовке контейнера к работе его разбирают, разделяя на две равные чаши (2). Чаши контейнера изготовлены в форме двух полусфер, скрепленных между собой при помощи резьбового соединения (3). Чаши выполняются с перфорированной поверхностью (4) диаметром 2–3 мм. Перед загрузкой в устройство модификатора отверстия (4) перфорированной поверхности чаш (2) плотно затыкают бумагой или ватой. Модификатор загружается в контейнер в виде порошка либо в виде прессованных таблеток. После загрузки

модификатора чаши соединяют, получая единый контейнер (1).

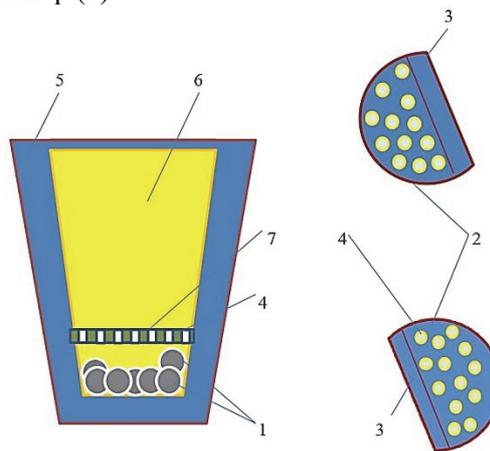


Рис. 1. Устройство для ввода УДП в металлический расплав:

- 1 – разборный контейнер (силицированный графит);
- 2 – составные чаши контейнера; 3 – резьба;
- 4 – перфорированная поверхность;
- 5 – тигель (или разливочный ковш);
- 6 – металлический расплав; 7 – графитовая сетка

Figure 1. Device for entering ultrafine powders (UFP) into a metal melt:

- 1 – collapsible container (silicified graphite);
- 2 – composite container bowls; 3 – thread; 4 – perforated surface;
- 5 – crucible (or ladle); 6 – metal melt; 7 – graphite mesh

² Патент РФ № 2439166. Способ модифицирования чугуна и силумина / Сенкус В.В., Селянин И.Ф., Гетман А.А., Дорошилов А.В. и др.; опубл. 10.01.2012 в БИ.

³ В варианте устройства контейнеры могут быть любой формы (эллипсоидной, кубической, прямоугольной и т. д.).

Затем контейнеры (по 3–4 шт.) опускают на дно тигля (5). Чтобы контейнеры не всплыли сразу после заливки жидкого металла (6) в тигель, сверху над ними устанавливают графитовую сетку (7). После заливки металла в тигель производится его выдержка, необходимая для прохождения процесса модифицирования, а затем – подача в изложницы (формы). По окончании процесса литья тигель устанавливают на площадку для охлаждения, после чего из него вынимают графитовую сетку⁴ и контейнеры. При заполнении тигля металлическим расплавом загруженный на его дно контейнер с модификатором некоторое время будет удерживаться графитовой сеткой. В течение этого времени в отверстиях полусфер прогорит бумага (или вата) и сквозь перфорированную поверхность прольется жидкий металл, заполняя контейнер.

Заполнив контейнер, жидкий расплав захватывает дисперсный порошок и уносит его в объем расплава, производя модифицирование последнего.

Результаты обсуждения

Модифицирование бронзы производили алюминий- и кремнийсодержащими УДП фракции $-100+0$ мкм в концентрации 0,2–0,25 % (рис. 2). Результаты исследования состава и структуры модифицированных УДП алюминиевой и кремнистой бронзы (БрКЗМц1 и БрА7 соответственно, табл. 1) представлены в табл. 3. Установлено, что вследствие модифицирования происходит интенсивное измельчение структурных составляющих сплава при одновременном повышении его механических свойств (табл. 3, рис. 3).



Рис. 2. УДП оксидов алюминия и кремния при различном увеличении: а – $\times 7500$; б – $\times 38\,300$

Figure 2. Ultrafine powders (UFP) of aluminum and silicon oxides at different magnification: а – $\times 7500$; б – $\times 38,300$



Рис. 3. Микроструктура бронзы БрА7 (увеличение $\times 100$):

а – немодифицированная; б – после модифицирования МХА порошком оксида алюминия фракцией $-100+0$ мкм

Figure 3. Microstructure of bronze BrA7 (magnification $\times 100$):

а – unmodified; б – after modification of MOSS with aluminum oxide powder fraction $-100+0$ microns

⁴ В варианте устройства сетку выполняют из сплава требуемого состава. Время расплавления сетки обеспечивает длительность выдержки жидкого расплава в тигле.

Таблица 3

Механические свойства модифицированных бронз БрА7 и БрКЗМц1, МПа, оксидов алюминия и кремния фракцией –100+0 мкм

Сплав	Модификатор, %	σ_s , МПа	δ , %	НВ, МПа	Размер	
					Зерна, мм	Дендритной ячейки, мкм
БрА7	0	1000	4	70	1,238	27,42
БрА7	Al ₂ O ₃ (0,25 %)	1040	5	74	0,533	27,15
БрКЗМц1	0	350	25	95	1,141	20,45
БрКЗМц1	SiO ₂ (0,25 %)	390	27,7	97	0,655	20,16

Table 3

Mechanical properties of modified bronzes BrA7 and BRK3MTS1, МПа, of aluminum and silicon oxides with a fraction of –100+0 microns

Alloy	Modifier, %	σ_s , МПа	δ , %	НВ, МПа	Size	
					Grain, mm	Dendritic cell, μm
BrA7	0	1000	4	70	1.238	27.42
BrA7	Al ₂ O ₃ (0.25%)	1040	5	74	0.533	27.15
BrK3Mc1	0	350	25	95	1.141	20.45
BrK3Mc1	SiO ₂ (0.25%)	390	27.7	97	0.655	20.16

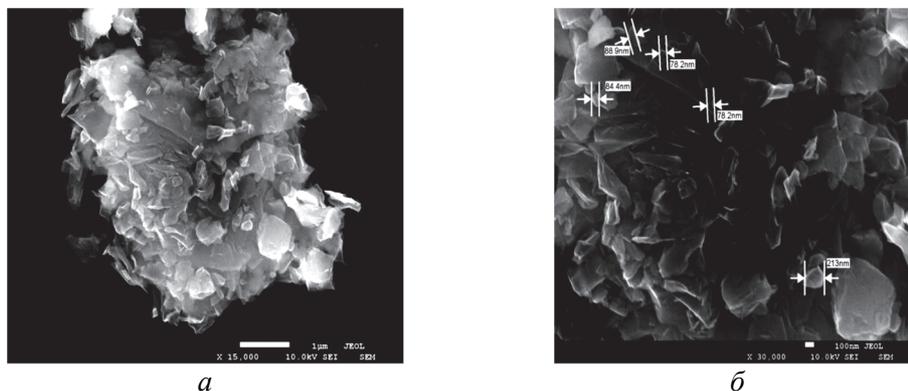


Рис. 4. Размер и форма частиц природного графита марки ГЛ-1 (ГОСТ 5279–74⁵) при различном увеличении: а – $\times 15\,000$; б – $\times 30\,000$

Figure 4. Size and shape of natural graphite grade GL-1 (GOST 5279–74⁶) particles at various magnifications: а – $\times 15,000$; б – $\times 30,000$

Таблица 4

Механические свойства модифицированной бронзы БрО5Ц5С5 порошком природного графита фракцией –100+0 мкм

Сплав	Модификатор, %	Механические свойства			Размер	
		σ_s , МПа	δ , %	НВ, МПа	Зерна, мм	Дендритной ячейки, мкм
БрО5Ц5С5	0	176	4	60	1,32	28,75
БрО5Ц5С5	Графит ГЛ-1 (0,2)	180	6,5	64	0,94	21,56

Table 4

Mechanical properties of modified bronze BrO5C5C5 with natural graphite powder fraction –100+0 microns

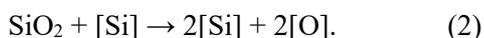
Alloy	Modifier, %	Mechanical properties			Size	
		σ_s , МПа	δ , %	НВ, МПа	Grain, mm	Dendritic cell, μm
BrO5C5C5	0	176	4	60	1.32	28.75
BrO5C5C5	Graphite GL-1 (0.2)	180	6.5	64	0.94	21.56

⁵ ГОСТ 5279–74 Графит кристаллический литейный. Технические условия. М., 2003.

⁶ GOST 5279–74. Crystal graphite for foundry purposes. Specifications. Moscow; 2003. (In Russ.)

Таким образом, модифицирование бронзы УДП оксидов алюминия и кремния фракцией с размерами $-100+0$ мкм позволяет получать сплавы с улучшенными характеристиками внутренней структуры и механических свойств.

Однако при модифицировании кремнистой и алюминиевой бронзы порошками оксидов алюминия и кремния фракцией наноразмеров возможно следующее взаимодействие модификатора с расплавом:



По этой причине дальнейшие эксперименты провели с бронзой марки БрО5Ц5С5 (табл. 2), модифицируя сплав УДП порошком углерода марки ГЛ-1 фракцией $-100+0$ мкм как абсолютно индифферентным к металлическому расплаву и его компонентам (рис. 4). Полученные результаты представлены в табл. 4.

Модифицирование бронзы БрО5Ц5С5 УДП природного графита марки ГЛ-1 сопровождалось интенсивным измельчением микрозерна и дендритной ячейки, при этом значительно улучшились показатели механических свойств сплава.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования процесса модифицирования бронзы БрА7, БрКЗМц1, БрО5Ц5С5 УДП оксидов кремния и алюминия, а также природного графита фракцией $-100+0$ мкм в концентрации 0,2–0,25 %. Показано, что модифицирование ультрадисперсными механохимически активированными порошками расплавов бронзы отражается на микроструктуре сплавов, интенсивно измельчая ее по сравнению с исходной структурой. Установлено, что уменьшение размеров дендритной ячейки модифицированных сплавов составляет 1–25 %, зерна – 175–230 %; при этом повышаются механические свойства металла (%): σ_b – 3,84–10,25; HB – 2–5,04; δ – 9,74–20.

Разработано устройство для модифицирования жидкого металлического расплава порошковыми модификаторами.

Список литературы

1. *Карбасов Ю.С.* Новые материалы. М.: МИСиС, 2002. 736 с.

2. *Цеханов Ю.А., Харченко И.В., Джемалядинов Р.М., Скакун В.В.* Влияние ультрадисперсных модификаторов технологических сред на силовые характеристики процесса точения конструкционных материалов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 140–145.

3. *Задиратов А.Н., Колтунов И.И., Малькова М.Ю.* Нанотехнологии в металлургии. М.: ЦКТ, 2012. 224 с.

4. *Круушенко Г.Г.* Применение нанопорошков химических соединений для улучшения качества металлоизделий // Технология машиностроения. 2002. № 3. С. 3–6.

5. *Zykova A., Kalashnikov M., Popova N., Kurzina I.* Fine structure and phase composition of Fe–14Mn–1.2C steel: influence of a modified mixture based on refractory metals // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2017. Vol. 24. No 5. Pp. 523–529.

6. *Зыкова А.П., Федосеев С.Н., Лычагин Д.В.* Модифицирование стали 110Г13Л ультрадисперсными порошками оксидов тугоплавких металлов // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 9 (210). С. 3–7. <https://doi.org/10.14489/hb.2014.09.pp.003-007>

7. *Зыкова А.П., Чумаевский А.В., Лычагин Д.В., Курзина И.А., Абзаев Ю.А., Деммент Т.В.* Влияние модифицирования ультрадисперсными порошками оксидов металлов на деформационное поведение и разрушение чугуна марки ИЧХ28Н2 // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 12–2. С. 110–115.

8. *Зыкова А.П., Курзина И.А., Чумаевский А.В., Лычагин Д.В.* Модифицирование чугунов ультрадисперсными порошками оксидов металлов // Научно-технический прогресс в черной металлургии: I Международная научно-техническая конференция (Череповец, 2–4 октября 2013 г.) / отв. ред. А.Л. Кузьминов. Череповец, 2013. С. 112–114.

9. *Зыкова А.П., Лычагин Д.В., Чумаевский А.В., Курзина И.А., Новомейский М.Ю.* Влияние модифицирования ультрадисперсными порошками оксидов тугоплавких металлов и криолита на структуру, механические свойства и разрушение чугуна СЧ25 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 11. С. 37–42.

10. *Zykova A., Lychagin D., Chumaevsky A., Popova N., Kurzina I.* Influence of ultrafine particles on structure, mechanical properties, and strengthening of ductile cast iron // Metals. 2018. Vol. 8. No. 7. 559. <http://doi.org/10.3390/MET8070559>

11. *Панин С.В., Корниенко Л.А., Ваннасри С., Иванова Л.Р., Шилько С.В.* Сравнительный анализ влияния нано- и микронаполнителей окисленного Al на фрикционно-механические свойства СВМПЭ // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 5. С. 492–499.

12. *Zykova A., Martyushev N., Skeebea V., Zadkov D., Kuzkin A.* Influence of W addition on microstructure and mechanical properties of Al-12%Si alloys // Materials. 2019. Vol. 12. No 6. 981. <https://doi.org/10.3390/ma12060981>

13. Zykova A., Kazantseva L., Vorozhtsov A., Kurzina I., Popova N. Influence of modifying mixtures on Si crystal formation in Al-7%Si alloy // *Metals*. 2018. Vol. 8. No 2. 98. <https://doi.org/10.3390/MET8020098>

14. Martyushev N.V., Bashev V.S., Zykova A.P. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 177. 012118. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012118>

15. Баишев В.С. Исследование влияния ультрадисперсного порошка W на структуру и свойства литейного сплава системы Al-Si // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): тексты докладов участников международной молодежной научной конференции: в 6 т. Т. 1. Казань, 2019. С. 231–235.

16. Semenov I.V., Martyushev N.V., Drozdov Y.Y., Zykova A.P., Popelyukh A.I., Alpeisov A.T. The influence of modification by superdispersed powders on the lead-TiN-base bronze structure // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. 012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012114>

17. Серикбол А., Федосеев С.Н. Модифицирование материалов ультрадисперсными порошками // Перспективное развитие науки, техники и технологий: материалы 3-й Международной научно-практической конференции (Курск, 18 октября 2013 г.): в 3 т. Т. 3 / отв. ред. А.А. Горохов. Курск, 2013. С. 205–207.

18. Сабуров В.П., Черепанов А.Н., Жуков М.Ф., Галевский Г.В., Крушенико Г.Г., Борисов В.Т. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов // *Низкотемпературная плазма: в 12 т. Т. 12*. Новосибирск: Наука, 1995. 344 с.

References

1. Karabasov YuS. *New materials*. Moscow: MISiS Publ.; 2002. (In Russ.)

2. Sekhanov YuA, Harchenko IV, Dzhemalyadinov RM, Skakun VV. Influence of ultradispersed modifiers of fluids on power characteristics of the process of cutting construction materials. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018;14(6):140–145. (In Russ.)

3. Zadiranov AN, Koltunov II, Malkova MYu. *Nanotechnology in metallurgy*. Moscow: CKT Publ.; 2012. (In Russ.)

4. Krushenko GG. Application of nanopowders of chemical compounds to improve the quality of metal products. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2002;(3):3–6. (In Russ.)

5. Zykova A, Kalashnikov M, Popova N, Kurzina I. Fine structure and phase composition of Fe–14Mn–1.2C steel: influence of a modified mixture based on refractory metals. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2017;24(5):523–529.

6. Zykova AP, Fedoseev SN, Lychagin DV. Steel GX120MN12 modifying by ultradisperse pow-

ders of refractory metal oxides. *Handbook. An Engineering Journal*. 2014;(9(210)):3–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.14489/hb.2014.09.pp.003-007>

7. Zykova AP, Chumaevskij AV, Lychagin DV, Kurzina IA, Abzaev YuA, Dement TV. The effect of modification of metal oxides by ultrafine powders on the deformation behavior and destruction of cast iron of the ICHH28H2 grade. *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Fizika*. 2013;56(12–2):110–115. (In Russ.)

8. Zykova AP, Kurzina IA, Chumaevskij AV, Lychagin DV. Modification of cast iron with ultrafine powders of metal oxides. In: Kuzminov AL. (ed.) *Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy: 1st International Scientific and Technical Conference* (Cherepovets, 2–4 October 2013). Cherepovets; 2013. p. 112–114. (In Russ.)

9. Zykova AP, Lychagin DV, Chumaevskij AV, Kurzina IA, Novomejskij MYu. Influence of modification by ultradispersed powders of oxides of refractory metals and cryolite on the structure, mechanical properties and destruction of SCH25 cast iron. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014;57(11):37–42. (In Russ.)

10. Zykova A, Lychagin D, Chumaevsky A, Popova N, Kurzina I. Influence of ultrafine particles on structure, mechanical properties, and strengthening of ductile cast iron. *Metals*. 2018;8(7):559. <http://doi.org/10.3390/MET8070559>

11. Panin SV, Kormienko LA, Vannarsi S, Ivanova LR, Shilko SV. Comparative analysis of the influence of nano- and microfillers of oxidized al on the frictional-mechanical characteristics of UHMWPE. *Journal of Friction and Wear*. 2010;31(5):371–377. (In Russ.)

12. Zykova A, Martyushev N, Skeebe V, Zadkov D, Kuzkin A. Influence of W addition on microstructure and mechanical properties of Al-12%Si alloys. *Materials*. 2019;12(6):981. <https://doi.org/10.3390/ma12060981>

13. Zykova A, Kazantseva L, Vorozhtsov A, Kurzina I, Popova N. Influence of modifying mixtures on Si crystal formation in Al-7%Si alloy. *Metals*. 2018;8(2):98. <https://doi.org/10.3390/MET8020098>

14. Martyushev NV, Bashev VS, Zykova AP. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;177:012118. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012118>

15. Bashev VS. Investigation of the effect of ultrafine powder W on the structure and properties of the foundry alloy of the Al-Si system. *24th Tupolev Readings (School of Young Scientists: Texts of Reports of Participants of the International Youth Scientific Conference* (vol. 1, p. 231–235). Kazan; 2019. (In Russ.)

16. Semenov IV, Martyushev NV, Drozdov YY, Zykova AP, Popelyukh AI, Alpeisov AT. The influence of modification by superdispersed powders on the lead-TiN-base bronze structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016:012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012114>

17. Serikbol A, Fedoseev SN. Modification of materials with ultrafine powders. In Gorokhov AA (ed.) *Perspective development of science, technology and technologies. Materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference* (vol. 3). Kursk; 2013. p. 205–207. (In Russ.)

18. Saburov VP, Cherepanov AN, Zhukov MF, Gulevskij GV, Krushenko GG, Borisov VT. Plasma chemical synthesis of ultrafine powders and their application for modification of metals and alloys. *Low-Temperature Plasma* (vol. 12). Novosibirsk: Nauka Publ.; 1995. (In Russ.)

Сведения об авторах

Малькова Марианна Юрьевна, доктор технических наук, директор департамента машиностроения и приборостроения, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-6939-1658, Scopus Author ID: 57214744555, eLIBRARY SPIN-код: 2680-1505. E-mail: malkova-myu@rudn.ru

Задиров Александр Никитич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4. ORCID: 0000-0001-7787-8290, Scopus Author ID: 57214856655, eLIBRARY SPIN-код: 2873-6465. E-mail: zadiranov@mail.ru

Герасимова Ирина Николаевна, старший преподаватель, кафедра процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4. ORCID: 0000-0001-7829-9610, eLIBRARY SPIN-код: 1642-3527. E-mail: malviktp@gmail.com

Грушева Татьяна Геннадьевна, старший преподаватель, кафедра процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4. ORCID: 0000-0003-0515-4167, eLIBRARY SPIN-код: 3589-5839. E-mail: malviktp@gmail.com

About the authors

Marianna Yu. Malkova, Doctor of Technical Sciences, Director of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6939-1658, Scopus Author ID: 57214744555, eLIBRARY SPIN-code: 2680-1505. E-mail: malkova-myu@rudn.ru

Alexander N. Zadiranov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Boris Galushkin St, Moscow, 129366, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7787-8290, Scopus Author ID: 57214856655, eLIBRARY SPIN-code: 2873-6465. E-mail: zadiranov@mail.ru

Irina N. Gerasimova, senior lecturer, Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Boris Galushkin St, Moscow, 129366, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7829-9610, eLIBRARY SPIN-code: 1642-3527. E-mail: mal-viktpp@gmail.com

Tatiana G. Grusheva, senior lecturer, Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Boris Galushkin St, Moscow, 129366, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7829-9610, eLIBRARY SPIN-code: 3589-5839. E-mail: mal-viktpp@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-65-74
УДК 626.01

Научная статья / Research article

Экспериментальные исследования влияния волнения на подводный трубопровод

К.П. Мордвинцев , Е.М. Корнеева  

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
 korneeve.e.m@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 10 января 2022 г.
Доработана: 21 марта 2022 г.
Принята к публикации: 28 марта 2022 г.

Ключевые слова:

морской подводный трубопровод,
устойчивость трубопровода,
экспериментальные исследования

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований по воздействию волновой нагрузки на заглубленный трубопровод. В настоящее время происходит активное освоение больших месторождений, расположенных на шельфе и северных реках (таких как Обская губа, Енисей), откуда должна производиться доставка к местам потребления. Наиболее удобным видом транспортировки жидких веществ является трубопровод. Чаще всего его трасса пересекает водные территории, размеры которых могут достигать пяти километров и более. Подобные габариты допускают возникновение волновой нагрузки, действующей на трубопровод. Вопрос его устойчивости особенно актуален для проектировщиков, чтобы избежать возникновения аварийных ситуаций в ходе эксплуатации. На сегодняшний день нормативная документация не рассматривает этот вопрос. Учитывается только сила Архимеда без волнового воздействия. Причины и процесс перемещения трубы в грунте вверх с большим трудом поддаются теоретическому анализу, поэтому в основном изучаются эмпирическими методами. В данной работе экспериментальным путем устанавливается зависимость между волновой нагрузкой и выталкивающей силой. Проводится серия экспериментов с меняющимися параметрами волны и заглубления трубопровода. Материалы исследования будут полезны проектировщикам подводных морских трубопроводов.

Для цитирования

Мордвинцев К.П., Корнеева Е.М. Экспериментальные исследования влияния волнения на подводный трубопровод // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 65–74.
<http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-65-74>



Experimental studies of the impact of waves' loading on the underwater pipeline

Konstantine P. Mordvintsev , Ekaterina M. Korneeva  

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

 korneeva.e.m@yandex.ru

Article history

Received: January 10, 2022

Revised: March 21, 2022

Accepted: March 28, 2022

Keywords:

submarine pipeline, pipeline stability, experimental studies

Abstract. This work is devoted to the results of experimental studies on the impact of wave loading on a buried pipeline. Currently, there is an active development of large deposits located on the shelf and the northern rivers (Ob Bay, Yenisei), from where delivery to the places of consumption should be made. The most convenient type of transportation is the pipeline. Its route often crosses water areas, the size of which can reach five kilometres or more. Such dimensions allow the occurrence of a wave load acting on the pipeline. The issue of pipeline stability is especially relevant for designers in order to avoid accidents during operation. Nowadays, the regulatory documentation does not address this issue. Only the force of Archimedes is considered, without taking into account the wave action. The causes and process of moving the pipe up in the ground are difficult to theoretically analyze, therefore, it is mainly studied by empirical methods. In this work, the dependence between the wave load and the buoyancy force is established experimentally. The series of experiments was conducted with changing wave parameters and pipeline depth. This article will be useful for submarine pipeline designers.

For citation

Mordvintsev KP, Korneeva EM. Experimental studies of the impact of waves' loading on the underwater pipeline. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):65–74. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-65-74>

Введение

В настоящее время наиболее распространенным способом транспортировки добываемых полезных ископаемых, таких как нефть и газ, является трубопровод. При прокладке любого трубопровода необходимо решение достаточно большого количества технических задач. Учитывая географическую специфику расположения месторождений в России, при прокладке трубопроводов необходимо преодолевать большое количество водных преград и прокладывать их по дну морей. В этом случае важным является вопрос обеспечения устойчивости трубопровода от всплытия при его эксплуатации.

Для решения данной проблемы активно используется метод балластировки трубопровода, однако опыт эксплуатации показал, что в условиях прокладки трубопровода по морскому дну (морские трубопроводы), этого может быть недостаточно.

Многочисленные эксперименты, проводившиеся как в России, так и за рубежом¹ [1–5], показали, что на устойчивость трубопровода, по-

груженного в грунт на морском дне, оказывает влияние большое количество внешних сил.

Исследование влияния волны цунами на устойчивость трубопровода [3], установило, что существует зависимость гидродинамической силы в подводных трубопроводах от высоты волны и глубины.

Изучение влияния сейсмической нагрузки на трубопровод показало, что ее воздействие приводит к разжижению грунта [6]. Причиной этого являлось избыточное поровое давление, возникающее во время вибрации. Грунт вокруг трубопровода постепенно растекается, что вызывает изменение веса перекрывающего грунта, в результате чего нарушается равновесие трубопровода и труба всплывает.

Помимо этого, изучалось влияние волновой нагрузки [7]. Было измерено изменение порового давления около трубы во время волнового воздействия, которое носит колебательный характер. Исследования показали, что чем больше время действия и амплитуда гидродинамической вертикальной силы, тем короче время всплытия трубопровода.

Экспериментальным путем [8] определено, что под воздействием волновой нагрузки меняет-

¹ СП 107-34-96. Балластировка, обеспечение устойчивости положения газопроводов на проектных отметках / РАО «ГАЗПРОМ». М., 1996. 47 с.

ся структура грунта у оснований морских гидротехнических сооружений. Данная нагрузка увеличивает пористость грунтов, что может влиять на обеспечение устойчивости гидротехнических сооружений.

На сегодняшний день нормативная документация по расчету устойчивости морских трубопроводов² учитывает только силу Архимеда, не принимая во внимание волновое воздействие. Причины и процесс перемещения трубы в грунте вверх трудно поддаются теоретическому анализу, поэтому в основном изучаются эмпирическими методами.

Во многих исследованиях утверждается, что в случае расположения трубопровода в условиях мелкой воды волнение влияет на его устойчивость как за счет взвешивающего волнового воздействия, так и за счет разжижения грунтов.

В данной работе приводятся результаты лабораторного исследования влияния волнения на устойчивость трубопроводов.

Основные теоретические положения

На рис. 1 изображен поперечный разрез заглубленного трубопровода.

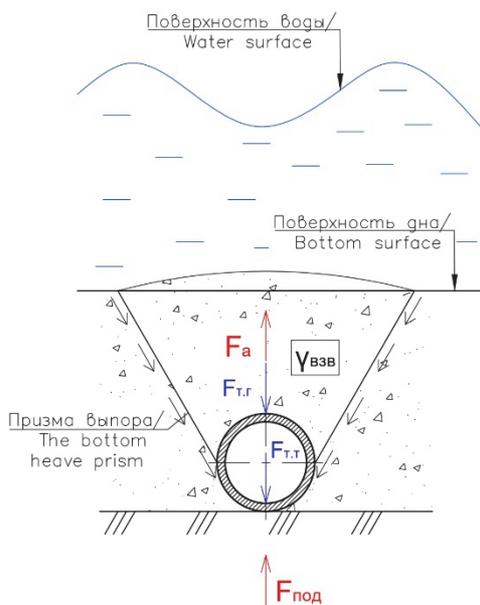


Рис. 1. Схема приложения нагрузок
Figure 1. Load application diagram

Предположим, что на трубопровод действуют две нагрузки: сила тяжести F_T и поднимающая сила F_{Π} . В значение нагрузки F_T входят сила тяжести грунта призмы выпора $F_{T,г}$ и собственный вес трубопровода $F_{T,т}$. В значение нагрузки F_{Π} входят сила Архимеда F_a и подъемная сила $F_{\text{под}}$, природу которой мы попытаемся установить. Таким образом, можно составить следующие выражения:

$$F_T = F_{T,г} + F_{T,т};$$

$$F_{\Pi} = F_a + F_{\text{под}}.$$

Рассмотрим участок трубопровода длиной 1 м. Значение величины $F_{T,г}$ определяется по формуле $F_{T,г} = mg + \frac{\pi d^2}{4} \rho$, где m – масса погонного метра трубы, g – ускорение свободного падения, d – диаметр трубопровода, ρ – плотность заполнителя. Масса внутреннего заполнителя несоизмеримо мала в сравнении с массой трубопровода, поэтому на данной стадии мы ее опускаем.

Предполагается, что грунт находится в разжиженном состоянии [9].

Причиной разжижения могут быть сейсмические воздействия [10] и интенсивно повторяющееся гидродинамическое воздействие на грунт [11–13].

Значение величины $F_{T,т}$ определяется по формуле $F_{T,т} = S \rho_{р,гр}$, где S – площадь призмы выпора, $\rho_{р,гр}$ – плотность разжиженного грунта, вычисляемая по формуле $\rho_{р,гр} = \frac{\rho_{ск,гр} \cdot \rho_{в} \cdot (1 + \omega)}{\rho_{ск,гр} \cdot \omega + 1}$, где $\rho_{ск,гр}$ – плотность скелета грунта, $\rho_{в}$ – плотность воды, ω – природная влажность грунта.

Значение величины силы Архимеда определяется следующим образом [14]:

$$F_a = \rho_{в} g W,$$

где $\rho_{в}$ – плотность воды; W – объем трубопровода, вычисляемый по формуле

$$W = \frac{\pi d^2}{4} l = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Требуется добиться соблюдения условия $F_{T,г} = F_a$, при котором тело не тонет, а находится во взвешенном состоянии.

Если под воздействием волновой нагрузки трубопровод начинает терять устойчивость, можно

² СП 33.13330.2012. Расчет на прочность стальных трубопроводов. М., 2013. П. 9.

заключить, что величина $F_{\text{под}}$ отлична от нуля. Тогда можно составить следующее выражение:

$$F_{\text{под}} \geq F_T - F_a.$$

Подставим вышеупомянутые выражения:

$$F_{\text{под}} \geq mg + S \left(\frac{\rho_{\text{ск.гр}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot (1 + \omega)}{\rho_{\text{ск.гр}} \cdot \omega + 1} \right) - \rho_{\text{в}} g \left(\frac{\pi d^2}{4} \right).$$

Таким образом, получим минимальное значение подъемной силы.

Представим выражение подъемной силы в виде параметрической функции $F_{\text{под}} = f(h, \lambda, d, t)$, где h – высота волны, λ – длина волны, D – глубина воды, t – глубина погружения трубы в грунт. Предполагается, что в данной ситуации оказывают влияние вязкость жидкости и коэффициент сопротивления грунта. Но на данной стадии проведения экспериментов эти показатели опускаются.

Чтобы упростить зависимость, введем параметры $n_1 = h/\lambda$ и $n_2 = D/h$, $n_3 = t$. Тогда функция приобретает следующий вид: $F_{\text{под}} = f(n_1, n_2, n_3)$

Для установления точных формул, позволяющих определить конкретное значение данной силы в конкретную фазу волны, требуется проведение серий экспериментов.

Результаты экспериментальных исследований

Лабораторные исследования проводились в лаборатории гидравлики Российского университета дружбы народов (рис. 2).

Экспериментальная установка размещалась в волновом лотке Armfield, позволяющем создавать регулярное волнение, где находился грунтовый лоток длиной 95 см и глубиной 16,5 см. В эксперименте использовался мелкий песок со средней крупностью 0,2 мм.

На рис. 3 показана принципиальная схема лабораторной установки. Модель трубопровода изготавливалась из трубок диаметром 25 мм. Длина трубок была подобрана по ширине экспериментального лотка и равнялась 295 мм. За счет внутреннего заполнения трубок их вес подбирался равным выталкивающей силе, то есть модельные трубки имели «нулевую» плавучесть.



Рис. 2. Экспериментальная установка (фото Е. Корнеевой)
Figure 2. Experimental setup (photo by E. Korneeva)

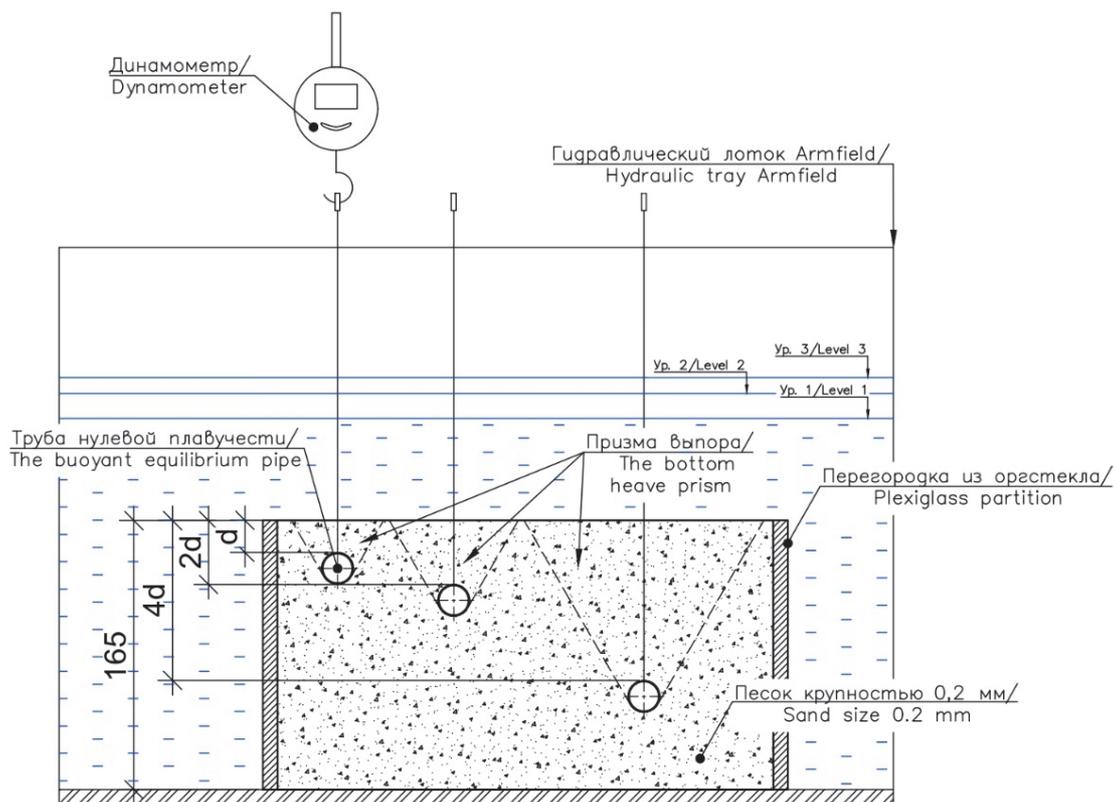


Рис. 3. Схема выполнения эксперимента
Figure 3. Experimental scheme

Модельные трубки погружались на три различные глубины, равные: 1 – диаметру трубки; 2 – двум диаметрам трубки; 3 – четырем диаметрам трубки, что позволяло установить зависимость влияния волновой нагрузки в зависимости от глубины погружения в грунт.

Устойчивость модельных трубок в грунте измерялась с помощью динамометра при их извлечении. На первом этапе определялась устойчивость трубок при отсутствии волнения. Сравнение данного значения усилия с усилиями при волновом воздействии позволяет определить влияние волнения на устойчивость заглубленного трубопровода.

Влияние волн на устойчивость модельных трубок выполнялось в серии экспериментов, в которых высота волны менялась от 0,1 до 0,2 м с шагом 0,05 м. Длина волны варьировалась от 0,40 до 0,75 м. Толщина водного слоя над поверхностью грунта менялась от 16,5 до 7,5 см.

В результате проведенных экспериментов получены данные, позволяющие оценить влияние волнения на устойчивость трубы, заглубленной в грунт.

На рис. 4 продемонстрирована зависимость удерживающей силы от вышележащего слоя грунта от крутизны волны. На этом графике отчетливо видно, что при различных характеристиках волны величина выдергивающей силы может как увеличиваться, так и уменьшаться по сравнению с величинами, снятыми без волнового воздействия. Также этот график показывает, что при заглублении трубы в грунт, равном диаметру трубы, грунт практически не влияет на устойчивость.

Для оценки влияния грунта на устойчивость трубы под действием волн введем параметр, показывающий приращение выдергивающей силы:

$$\Delta = \frac{F_{\text{дин}} - F_{\text{стат}}}{F_{\text{стат}}},$$

где $F_{\text{дин}}$ – величина выдергивающей силы при волновом воздействии; $F_{\text{стат}}$ – величина выдергивающей силы без волнового воздействия.

На рис. 5 показан график, на котором значение 0 является условно статическим. Условно статическим мы называем измеренное значение выдергивающей силы в спокойной воде.

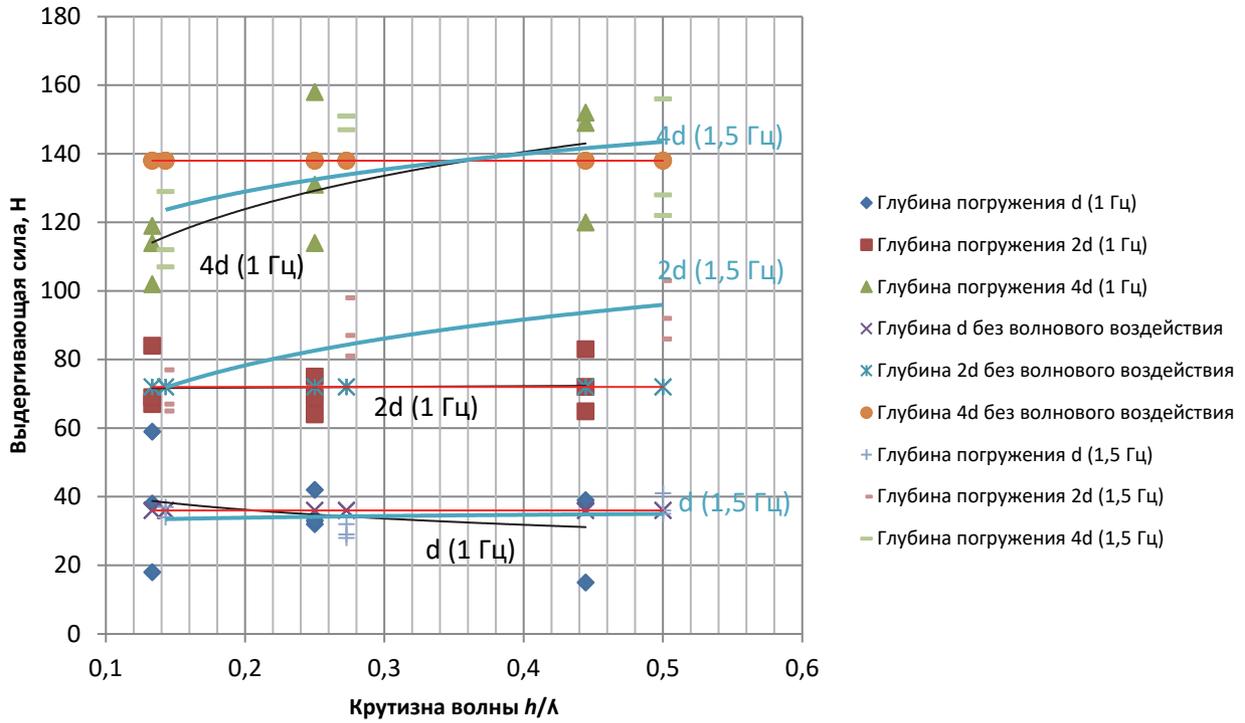


Рис. 4. Зависимость величины выдергивающей силы от крутизны волны

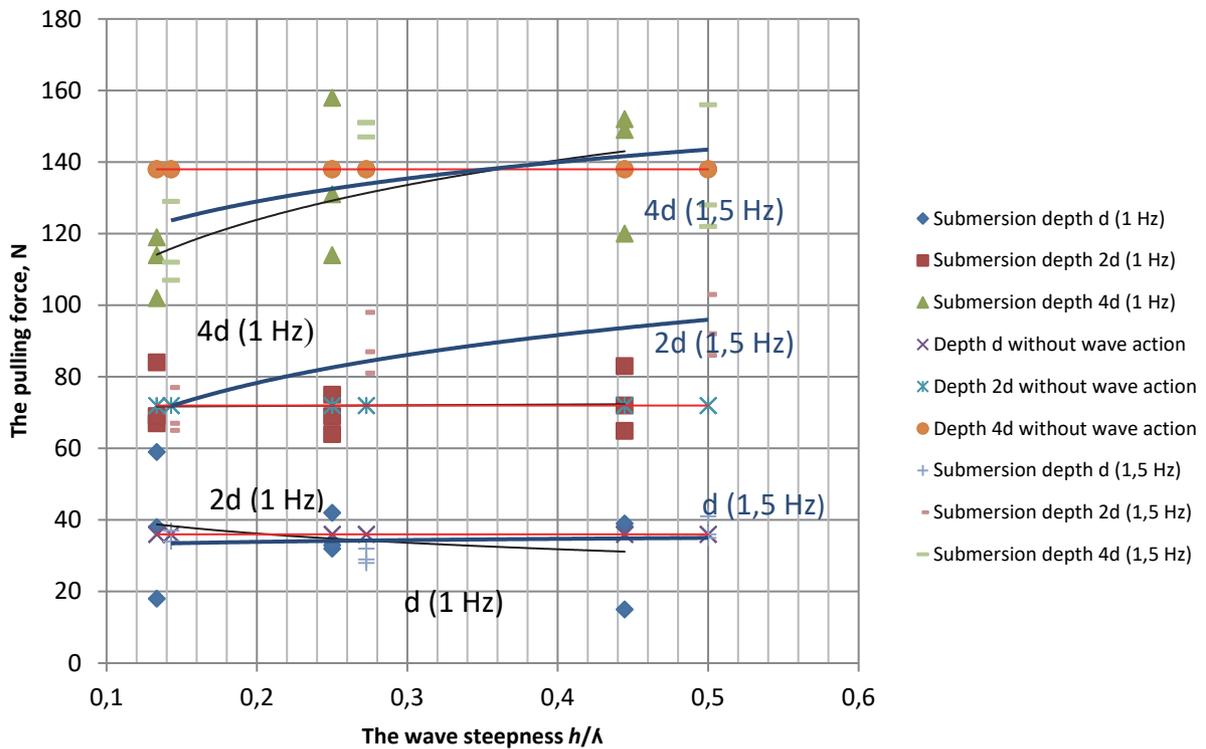


Figure 4. Dependence of the amount of the pulling force on the wave steepness

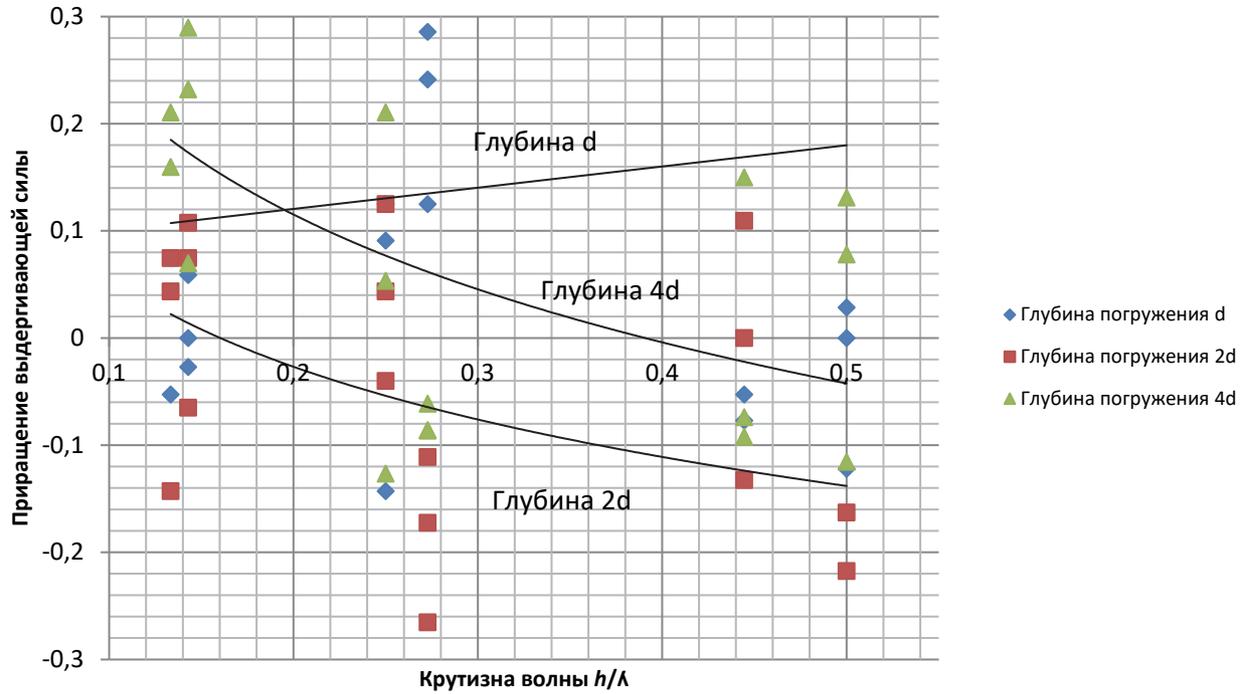


Рис. 5. Зависимость величины приращения выдергивающей силы от крутизны волны

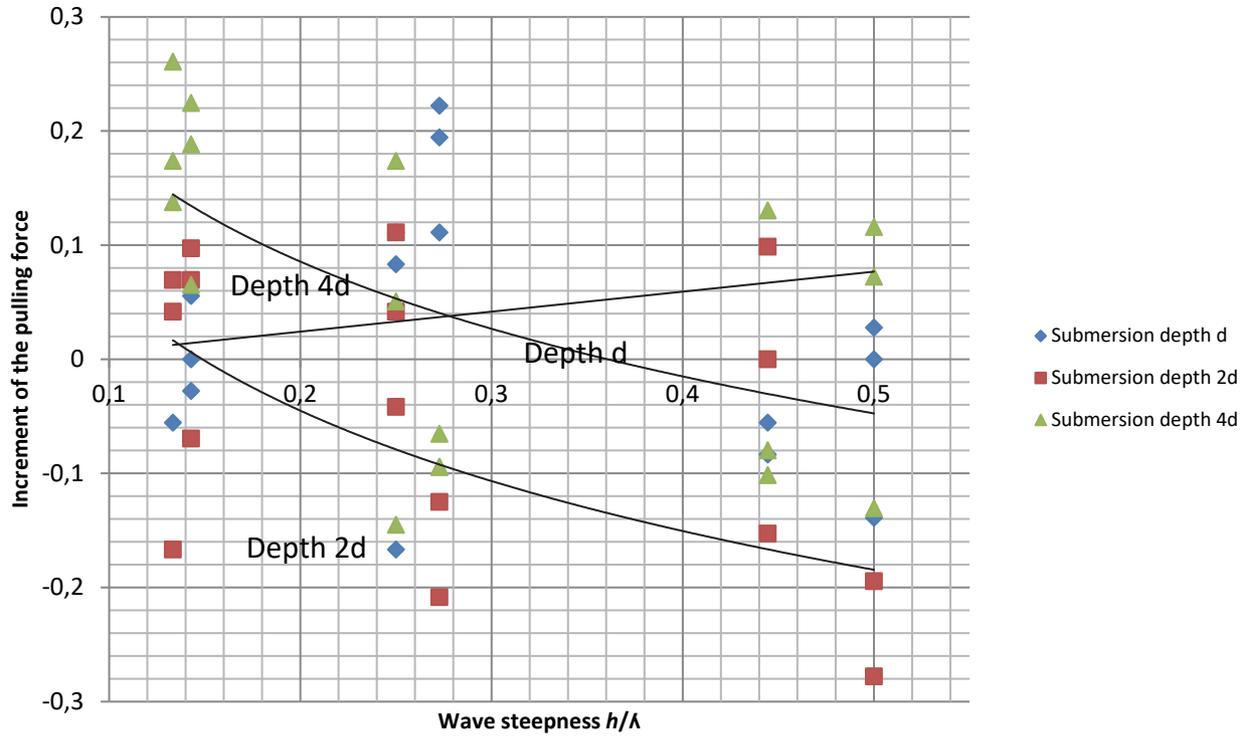


Figure 5. Dependence of the amount of the increment of the pulling force on the wave steepness

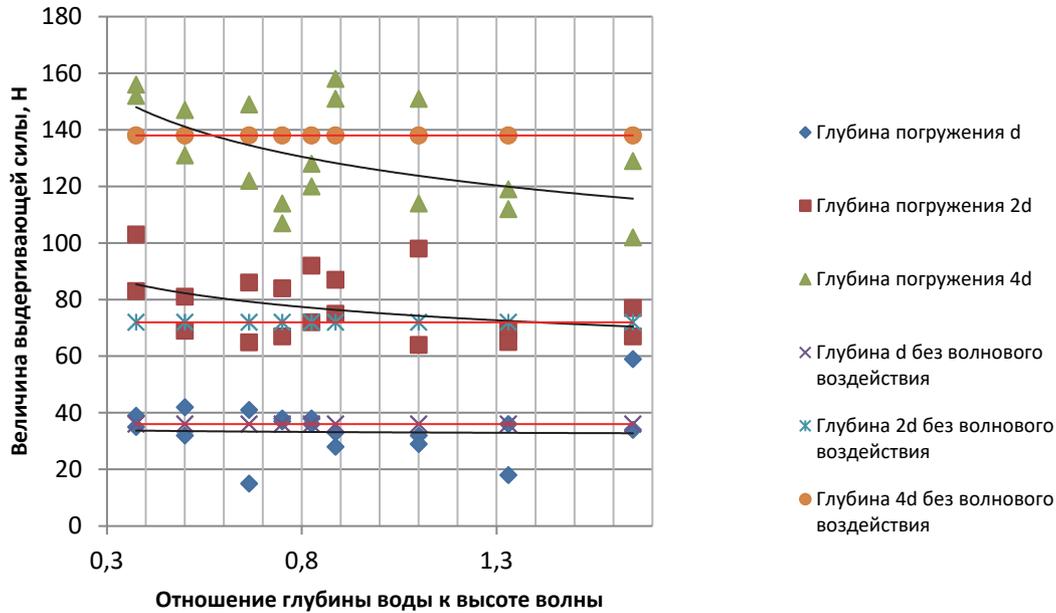


Рис. 6. Зависимость величины выдергивающей силы от отношения глубины воды к высоте волны, d/h

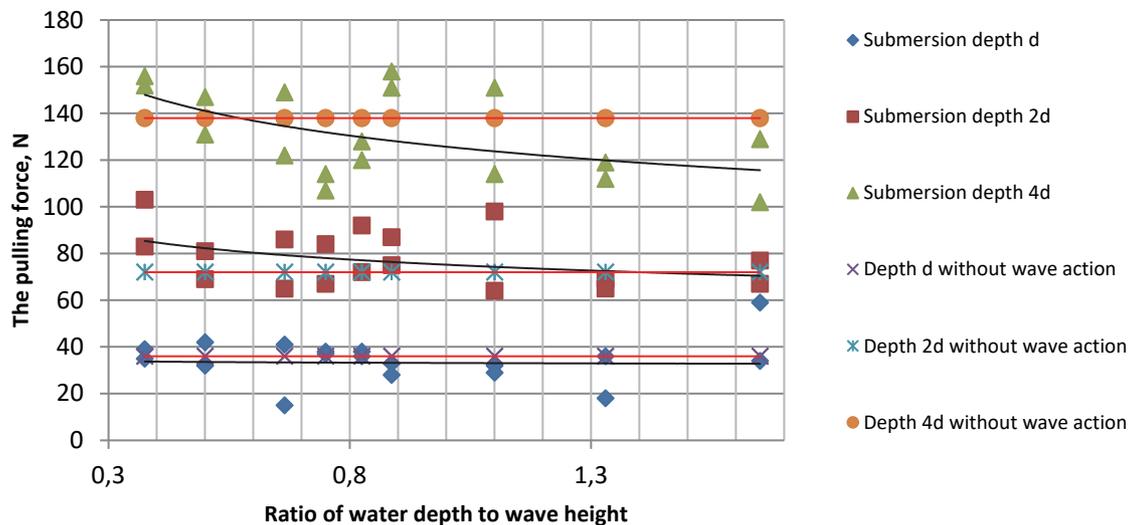


Figure 6. Dependence of the amount of the pulling force on the ratio of water depth to wave height, d/h

По данным графика можно сделать вывод, что на малых глубинах значение выдергивающей силы с ростом крутизны волны увеличивается, а на больших глубинах уменьшается. Это связано с влиянием разрушения волн при малых глубинах. Следовательно, влияние волнового нагруже-

ния в наибольшей степени зависит от разжижения грунтов при глубинах, больших, чем критические, при которых наблюдается обрушение волн.

Данное утверждение хорошо видно по зависимости удерживающей силы от отношения глубины воды к высоте волн.

График на рис. 6 показывает, что при увеличении отношения глубины воды к высоте значимые удерживающей силы значительно снижается, а значит, в наибольшей степени влияние волн на устойчивость трубопровода сказывается при глубинах, больших, чем глубины обрушения волн.

Заключение

Проведенная серия экспериментов позволяет сделать вывод, что волновое нагружение в мелководной зоне оказывает влияние на устойчивость трубопроводов. Увеличение высоты волны и ее крутизны приводит к повышению взвешивающих сил, действующих на трубопровод. Также установлено, что это влияние практически не сказывается на трубопроводах низкого заложения, но увеличивается для более заглубленных трубопроводов, что говорит о возможном разжижении грунтов, расположенных выше трубопровода. Данное влияние в наибольшей степени сказывается на глубинах больших, чем глубины обрушения.

Список литературы

1. Zhao E., Qu K., Mu L., Kraatz S., Shi B. Numerical study on the hydrodynamic characteristics of submarine pipelines under the impact of real-world tsunami-like waves // *Water*. 2019. Vol. 11. No. 2. 221. <https://doi.org/10.3390/w11020221>
2. Huang B., Liu J., Lin P., Ling D. Uplifting behavior of shallow buried pipe in liquefiable soil by dynamic centrifuge test // *Hindawi Publishing Corporation Scientific World Journal*. 2014. 838546. <https://doi.org/10.1155/2014/838546>
3. Magda W., Maeno S., Nago H. Flootation of buried submarine pipeline under cyclic loading of water pressure – numerical and experimental studies // *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology*. 2001. Vol. 691. Pp. 105–120. https://doi.org/10.2208/jscej.2001.691_105
4. Сарычев И.Л., Кузьбожев А.С., Бирилло И.Н., Маянц Ю.А., Елфимов А.В. Исследование причин изменения начального положения подводного перехода газопровод // *Вести газовой науки*. 2020. № S1 (43). С. 78–86.
5. Мансуров М.Н., Лаптева Т.И., Копачева Л.А. Влияние донных наносов и дампинга грунта на устойчивость морских подводных трубопроводов // *Вести газовой науки*. 2013. № 3 (14). С. 119–124.
6. Ясин Э.М., Черников В.И. Устойчивость подземных трубопроводов. М.: Недра, 1967. 120 с.
7. Ясин Э.М., Березин В.Л., Рацпенкин К.Е. Надежность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1972. 183 с.

8. Беляев Н.Д., Лебедев В.В., Алексеева А.В., Нуднер И.С., Семенов К.К., Щемелин Д.И. Исследования изменений структуры грунта при воздействии волн цунами на гидротехнические сооружения // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10. № 4. С. 44–53.

9. Торгов В.В., Цимбельман Н.Я. Изменение физико-механических свойств грунтов при сейсмическом воздействии // *Вологодские чтения*. 2008. № 70. С. 7–8.

10. Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // *Соросовский образовательный журнал*. 1998. № 2. С. 101–108.

11. Гилёв Е.Е., Шубин С.Н., Боровков А.И., Абрамян А.К. Моделирование гидродинамического воздействия на подводный газопровод в траншее с разжиженным грунтом // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2011. Т. 4. № 3. С. 41–47.

12. Sumer B.M., Truelsen C., Fredsøe J. Liquefaction around pipelines under waves // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2006. Vol. 132. No 4. Pp. 266–275. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(266\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(266))

13. Sumer B.M., Hatipoglu F., Fredsøe J., Ottesen Hansen N-E. Critical flotation density of pipelines in soils liquefied by waves and density of liquefied soils // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2006. Vol. 132. No 4. Pp. 252–265. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(252\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(252))

14. Зуйков А.Л. Гидравлика. М.: МГСУ, 2014.

References

1. Zhao E, Qu K, Mu L, Kraatz S, Shi B. Numerical study on the hydrodynamic characteristics of submarine pipelines under the impact of real-world tsunami-like waves. *Water*. 2019;11(2):221. <https://doi.org/10.3390/w11020221>
2. Huang B, Liu J, Lin P, Ling D. Uplifting behavior of shallow buried pipe in liquefiable soil by dynamic centrifuge test. *Hindawi Publishing Corporation Scientific World Journal*. 2014;838546. <https://doi.org/10.1155/2014/838546>
3. Magda W, Maeno S, Nago H. Flootation of buried submarine pipeline under cyclic loading of water pressure – numerical and experimental studies. *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology*, 2001;(691):105–120. https://doi.org/10.2208/jscej.2001.691_105
4. Sarychev IL, Kuzbozhev AS, Birillo IN, Mayanc YuA, Elfimov AV. Investigation of the reasons for changing the initial position of the gas pipeline underwater crossing. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2020;(S1(43)):78–86. (In Russ.)
5. Mansurov MN, Lapteva TI, Kopaeva LA. Influence of bottom sediment and soil dumping on the stability of offshore subsea pipelines. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2013;(3(14)):119–124. (In Russ.)
6. Yasin EM, Chernikin VI. *Stability of underground pipelines*. Moscow: Nedra Publ.; 1967. (In Russ.)

7. Yasin EM, Berezin VL, Rashchepkin KE. *Reliability of main pipelines*. Moscow: Nedra Publ.; 1972. (In Russ.)
8. Belyayev ND, Lebedev VV, Alekseyeva AV, Nudner IS, Semenov KK, Shchemelinin DI. Studies of changes in soil structure under the influence of wave tsunamis on hydraulic structures. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2017;10(4):44–53.
9. Torov VV, Cimbelman NYa. Change in the physical and mechanical properties of the soils under seismic impact. *Vologdinskije Chteniya*. 2008;(70):7–8. (In Russ.)
10. Voznesenskiy YeA. Earthquakes and soil dynamics. *Sorosovskiy Obrazovatel'nyy Zhurnal*. 1998;(2):101–108.
11. Gilyov EE, Shubin SN, Borovkov AI, Abramyan AK. Modeling of hydrodynamic impact on underwater gas pipeline in a trench with liquefied soil. *Computational Continuum Mechanics*. 2011;4(3):41–47. (In Russ.)
12. Sumer BM, Truelsen C, Fredsøe J. Liquefaction around pipelines under waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2006;132(4):266–275. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(266\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(266))
13. Sumer BM, Hatipoglu F, Fredsøe J, Ottesen Hansen N-E. Critical flotation density of pipelines in soils liquefied by waves and density of liquefied soils. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2006;132(4):252–265. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:4\(252\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:4(252))
14. Zuykov AL. *Hydraulics*. Moscow: MGSU Publ.; 2014. (In Russ.)

Сведения об авторах

Мордви́нцев Константи́н Петро́вич, кандидат технических наук, доцент департамента строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-3519-3960, eLIBRARY SPIN-код: 5476-8995. E-mail: mkp58@yandex.ru

Корне́ева Екатери́на Миха́йловна, магистрант, департамент строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-8059-7630. E-mail: korneeva.e.m@yandex.ru

About the authors

Konstantine P. Mordvintsev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Construction Department, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-3519-3960, eLIBRARY SPIN-code: 5476-8995. E-mail: mkp58@yandex.ru

Ekaterina M. Korneeva, master student, Construction Department, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-8059-7630. E-mail: korneeva.e.m@yandex.ru



Уважаемые коллеги!

Инженерная академия Российского университета дружбы народов приглашает вас принять участие в международной конференции

«ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ – 2022»

1–3 ноября 2022 года

Место проведения: Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, Инженерная академия РУДН.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ЯЗЫКИ КОНФЕРЕНЦИИ

Русский, английский.

ПУБЛИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ

Статьи будут опубликованы в сборнике трудов конференции, индексируемом в БД РИНЦ, журналах из Перечня ВАК.

НАУЧНЫЕ СЕКЦИИ

- Материаловедение, металлургия и нанотехнологии.
- Машиностроение, энергетика и транспорт.
- Авиационные и космические системы.
- Геология, горное и нефтегазовое дело.
- Гражданское, промышленное и гидротехническое строительство.
- Архитектура и промышленный дизайн.
- Инновационный менеджмент в промышленности.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Организатор конференции: Российский университет дружбы народов (РУДН).

Место проведения конференции:

Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, Инженерная академия РУДН.

Заседание секции «Машиностроение, энергетика и транспорт» состоится по адресу:

Москва, Подольское ш., д. 8, корп. 5.

Председатель Оргкомитета:

Малькова Марианна Юрьевна, доктор технических наук, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН. E-mail: malkova-myu@rudn.ru