



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

2022 Том 23 № 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-2

<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, Университет-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 11.08.2022. Выход в свет 18.08.2022. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 12,55. Тираж 500 экз. Заказ № 418. 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 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-2

<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 “Krzhizhanovsky 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

Купреев С.А., Мельников В.М., Самусенко О.Е., Бондаренко Ю.А., Яблоновский П.А. Движение твердой гантели с маховиком в центральном гравитационном поле	83
Александров Н.Э., Ермаков Д.Н., Бром А.Е., Омельченко И.Н., Шкодинский С.В. Современные аспекты применения искусственного интеллекта для прогнозирования стихийных бедствий на реках Российской Федерации (на примере реки Амур)	97
Malinina N.L. Necessary and sufficient conditions for dividing the structure of algorithms into non-intersecting sets: polynomial and enumeration algorithms (Необходимые и достаточные условия разделения структур алгоритмов на непересекающиеся множества: полиномиальные и переборные алгоритмы)	108
Усачев В.В., Беляев В.В., Чаусов Д.Н., Мойсеенко С.В. Автоматизированная система оптических измерений жидкокристаллических элементов с улучшенными характеристиками выходного сигнала	117
Белов В.В., Сазонова С.А. Некоторые аспекты исследования возможности строительства АЭС на Луне	124
Kornilova A.V., Kyaw Zaya. The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in carbon hypoeutectoid steels (Влияние температуры нагрева на изменение коэрцитивной силы и твердости углеродистых доэвтектидных сталей)	140
Ходяков А.А., Хлопков С.В., Басова В.В., Телков О.И., Космачева А.Д. Оценка технического состояния электромагнитных форсунок на стенде по погрешности измерения расхода тестовой жидкости	146
Круглова Л.В., Сисей Ф.К. Дополненная реальность в интеллектуальной системе управления транспортным средством	155
Георгиевский А.Ф., Бугина В.М. Целесообразность попутной добычи фосфоритов и глауконитов при разработке титан-цирконовых россыпей месторождения Центральное	165
Котельников А.Е., Ондо Айенвеге Л.М. Геологическое строение и нефтегазоносность шельфа Республики Экваториальная Гвинея	174

CONTENTS

Kupreev S.A., Melnikov V.M., Samusenko O.E., Bondarenko Yu.A., Yablonovsky P.A. Motion of a rigid dumbbell with a flywheel in a central gravitational field	83
Aleksandrov N.E., Ermakov D.N., Brom A.E., Omelchenko I.N., Shkodinsky S.V. Modern aspects of the use of artificial intelligence for predicting natural disasters on the rivers of the Russian Federation (using the example of the Amur River)	97
Malinina N.L. Necessary and sufficient conditions for dividing the structure of algorithms into non-intersecting sets: polynomial and enumeration algorithms	108
Usachev V.V., Belyaev V.V., Chausov D.N., Moyseenko S.V. Automatized system of optical measurements of liquid crystal elements with improved output signal characteristics	117
Belov V.V., Sazonova S.A. Some aspects of the possibility of building a nuclear power plant on the Moon	124
Kornilova A.V., Kyaw Zaya. The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in carbon hypoeutectoid steels	140
Khodyakov A.A., Khlopkov S.V., Basova V.V., Telkov O.I., Kosmacheva A.D. Evaluation of the technical condition of electromagnetic injectors on the test bench according to the error in measuring the flow rate of the test liquid	146
Kruglova L.V., Ceesay F.K. Augmented reality in an intelligent vehicle control system	155
Georgievskiy A.F., Bugina V.M. The rational for associated mining of phosphorites and glauconites in the development of titanium-zircon placers at the Tsentral'noye deposit	165
Kotelnikov A.E., Ondo Ayenvegue L.M. Geological structure and oil and gas content of the shelf of the Republic of Equatorial Guinea	174




DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-83-96
УДК 629.76

Научная статья / Research article

Движение твердой гантели с маховиком в центральном гравитационном поле

С.А. Купреев , В.М. Мельников , О.Е. Самусенко , Ю.А. Бондаренко , П.А. Яблоновский 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
 kupreev-sa@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 февраля 2022 г.
Доработана: 21 мая 2022 г.
Принята к публикации: 5 июня 2022 г.

Ключевые слова:






нереактивное движение, космический полет, гравилет, гравитация, движение без перегрузки


Аннотация. Изложены теоретические исследования механики космического полета протяженного твердого тела типа гантель. Представлено описание общей качественной картины возможности реализации нереактивного принципа движения протяженного тела в центральном гравитационном поле. В строгом соответствии законам классической механики показан нереактивный принцип перемещения центра масс протяженного тела в центральном гравитационном поле, основанный на внутреннем перераспределении полного кинетического момента тела между кинетическими моментами центра масс тела и относительно центра масс тела. Изучена динамика гравилета Белецкого – Гирвица. Рассмотрены вопросы практической реализации нереактивного принципа движения, в том числе с точки зрения квантовой физики. Показано, что принцип движения, основанный на использовании спина низкоэнергетических элементарных частиц, эффективнее фотонной ракеты. В частности, применение спина гравитона для движения тел в миллиард раз эффективнее применения гравитона для реактивного движения и позволяет достигнуть ускорения телом более 6600 м/с^2 без перегрузки. Полученные результаты могут быть использованы в экспериментах для поиска элементарных частиц с низкой энергией, объяснения космических феноменов и разработки транспортных объектов на новых физических принципах.

Для цитирования

Купреев С.А., Мельников В.М., Самусенко О.Е., Бондаренко Ю.А., Яблоновский П.А. Движение твердой гантели с маховиком в центральном гравитационном поле // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 83–96. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-83-96>

Motion of a rigid dumbbell with a flywheel in a central gravitational field

Sergei A. Kupreev , Vitaly M. Melnikov , Oleg E. Samusenko , Yuri A. Bondarenko , Pavel A. Yablonovskiy 

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation
 kupreev-sa@rudn.ru

Article history

Received: February 14, 2022
Revised: May 21, 2022
Accepted: June 5, 2022

Abstract. The article introduces theoretical studies of space flight of the dumbbell. A description of the general qualitative picture of the possibility of implementing the non-reactive principle of motion of an extended body in a central gravitational field is presented. In strict accordance with



Keywords:

non-reactive propulsion, space flight, gravitational flight, gravitation, motion without overload

the laws of classical mechanics, a non-reactive principle of displacement of the mass center of an extended body in a central gravitational field is shown, based on the internal redistribution of the total kinetic moment of the body between the kinetic moments of the mass center of the body and relative to the mass center of the body. The dynamics of the Beletsky – Hirwitz gravity plane has been studied. The issues of practical implementation of the non-reactive principle of motion are considered, including from the point of view of quantum physics. It is shown that the principle of motion based on the use of the spin of low-energy elementary particles is more efficient than a photon rocket. In particular, the use of the graviton spin for the motion of bodies is a billion times more efficient than the use of the graviton for jet motion and makes it possible to achieve body acceleration of more than $6,600 \text{ m/s}^2$ without overload. The results obtained can be used in experiments to search for elementary particles with low energy, to explain cosmic phenomena and to develop transport objects based on new physical principles.

For citation

Kupreev SA, Melnikov VM, Samusenko OE, Bondarenko YuA, Yablonovsky PA. Motion of a rigid dumbbell with a flywheel in a central gravitational field. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):83–96. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-83-96>

Введение

Проблема движения тел за счет внутренних сил с древних времен не дает покоя экспериментаторам [1]. Чего только не рождает неуемная человеческая фантазия [2]: эффект поступательного движения плоского высоковольтного конденсатора Т. Брауна [3], тележка-инерциод В.Н. Толчина [4], машина Н. Дина [5], магнитные летающие диски Д. Серла [6], двигательная установка EmDrive Р. Шойера [7], «квантовый» двигатель В.С. Леонова¹ и др.

Главная мысль изобретателей инерциодов – преобразование вращательного момента в поступательное движение. Классическая механика утверждает, что движение центра масс тела (или системы тел) определяется суммой всех внешних сил, действующих на тело (систему тел). При этом вращение тела относительно центра масс определяется суммой моментов всех внешних сил относительно этого центра. Все это толково расписано, в частности, в учебном пособии «Механика» Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица².

Однако любопытным остается факт возможности перемещения за счет внутренних сил достаточно протяженного тела в центральном гравитационном поле массивного объекта. Заранее следует подчеркнуть, что общий центр масс системы протяженного тела и массивного объекта не изменяется и речь пойдет в строгом соответствии законам классической механики.

Идеи такого перемещения рассматривались в работах В.В. Белецкого [8; 9], М.Е. Гиверца [10], А.В. Пироженко [11], Ю.М. Окунева [12; 13] и др.

Целью данной работы является изучение и описание общей качественной картины возможности реализации нереактивного принципа движения протяженного тела в центральном гравитационном поле.

Целью данной работы является изучение и описание общей качественной картины возможности реализации нереактивного принципа движения протяженного тела в центральном гравитационном поле.

1. Движение твердой гантели в центральном поле силы тяготения

Рассмотрим движение твердой гантели в центральном гравитационном поле Земли с колебаниями в плоскости орбиты. Будем полагать, что две концевые точечные массы гантели m_1 и m_2 соединены невесомым жестким стержнем длиной D . Со стороны Земли на гантель действуют силы гравитационного притяжения G_1 и G_2 (рис. 1).

Система сил притяжения G_1 и G_2 для твердой гантели эквивалента главному вектору системы сил F_C , приложенной в центре C , и главному моменту $M_C(G_1, G_2)$ сил G_1 и G_2 относительно центра C

¹ Патент РФ № 2185526. Способ создания тяги в вакууме и полевой двигатель для космического корабля (варианты) / Леонов В.С. 2002. Бюл. № 20.

² Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учебное пособие: в 10 т. Т. 1. Механика. М: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 224 с.

$$\mathbf{F}_C = \mathbf{G}_1 + \mathbf{G}_2; \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_C(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \mathbf{M}_C(\mathbf{G}_1) + \mathbf{M}_C(\mathbf{G}_2). \quad (2)$$

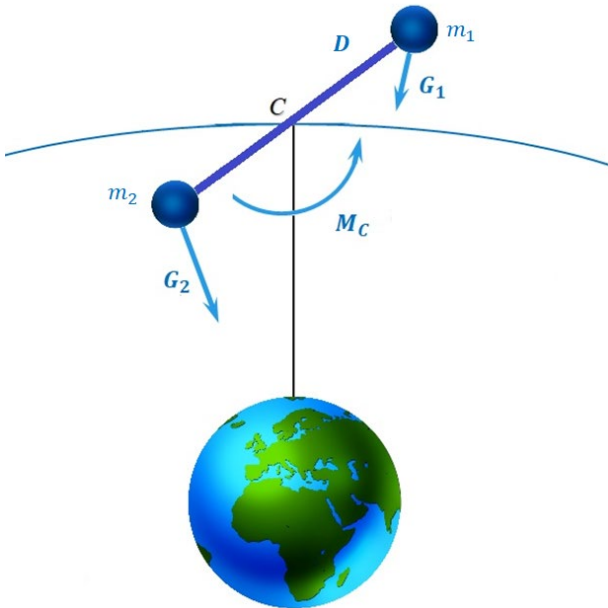


Рис. 1. Движение гантели в центральном гравитационном поле
Figure 1. Dumbbell movement in the central gravitational field

1.1. Определение главного вектора системы сил

Движение гантели удобно исследовать в орбитальной системе координат $Sxyz$ (рис. 2), связанной с центром масс гантели C . Ось Sy направлена вдоль местной вертикали от центра притяжения O (вдоль вектора \mathbf{r}). \mathbf{r} – радиус-вектор от центра притяжения O до центра масс гантели C . Ось Sx перпендикулярна оси Sy , лежит в плоскости траектории движения центра масс гантели C и направлена против направления движения по орбите центра масс гантели C . Ось Sz перпендикулярна плоскости Sxy и дополняет систему координат $Sxyz$ до правой.

Запишем уравнение (1) в проекциях на оси орбитальной системы координат $Sxyz$.

$$F_{Cx} = G_{1x} + G_{2x}; \quad (3)$$

$$F_{Cy} = G_{1y} + G_{2y}. \quad (4)$$

Модули сил притяжения \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 определим из уравнений

$$G_1 = \mu_0 \frac{m_1}{r_1^2}; \quad G_2 = \mu_0 \frac{m_2}{r_2^2}, \quad (5)$$

где $\mu_0 = 3,986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ – геоцентрическая гравитационная постоянная Земли; r_1 , – расстояние между точечной массой гантели m_1 и центром притяжения O ; r_2 – расстояние между точечной массой гантели m_2 и центром притяжения O .

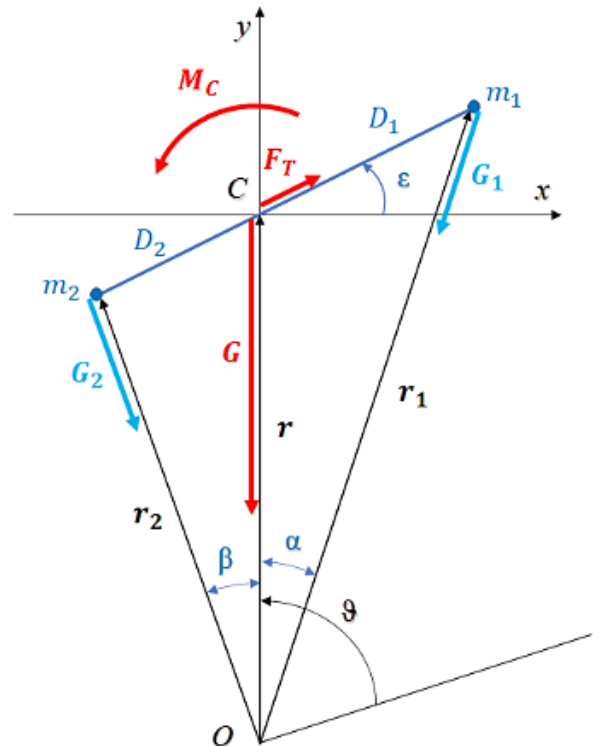


Рис. 2. Эквивалентные системы сил
Figure 2. Equivalent systems of forces

Проекции сил притяжения \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 на ось Sx (рис. 2):

$$G_{1x} = -G_1 \sin \alpha; \quad G_{2x} = G_2 \sin \beta, \quad (6)$$

где α – угол между векторами \mathbf{r}_1 и \mathbf{r} ; β – угол между векторами \mathbf{r}_2 и \mathbf{r} .

По теореме синусов

$$\frac{\sin \alpha}{D_1} = \frac{\sin(\pi/2 + \epsilon)}{r_1};$$

$$\frac{\sin \beta}{D_2} = \frac{\sin(\pi/2 - \epsilon)}{r_1}; \quad (7)$$

$$\sin \alpha = \frac{D_1}{r_1} \cos \varepsilon; \quad \sin \beta = \frac{D_2}{r_2} \cos \varepsilon; \quad (8)$$

где D_1, D_2 – расстояния от концевых масс гантели m_1 и m_2 до центра C соответственно; ε – угол между направлением на концевую массу гантели m_1 и осью Cx с вершиной в точке C (рис. 2). Отношение масс m_1 и m_2 , а также расстояний D_1 и D_2 обозначим безразмерным коэффициентом η :

$$\eta = m_2 / m_1 = D_1 / D_2; \quad (9)$$

$$D_1 + D_2 = D; \quad (10)$$

$$m_1 + m_2 = m. \quad (11)$$

Проекция сил притяжения \mathbf{G}_1 и \mathbf{G}_2 на ось Cy (рис. 2):

$$G_{1y} = -G_1 \cos \alpha; \quad G_{2y} = -G_2 \cos \beta, \quad (12)$$

где

$$\cos \alpha = \frac{r + D_1 \sin \varepsilon}{r_1}; \quad \cos \beta = \frac{r - D_2 \sin \varepsilon}{r_2}. \quad (13)$$

Из уравнений (3), (5), (6), (8) и принимая во внимание $m_1 D_1 = m_2 D_2$ (9) последовательно получаем проекцию главного вектора сил на ось Cx :

$$F_{Cx} = -G_1 \sin \alpha + G_2 \sin \beta; \quad (14)$$

$$F_{Cx} = -\mu_0 \frac{m_1 D_1}{r_1^2} \frac{1}{r_1} \cos \varepsilon + \mu_0 \frac{m_2 D_2}{r_2^2} \frac{1}{r_2} \cos \varepsilon; \quad (15)$$

$$F_{Cx} = \mu_0 m_1 D_1 \cos \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right). \quad (16)$$

Из уравнений (4), (5), (12) и (13) получаем проекцию главного вектора сил на ось Cy :

$$F_{Cy} = -G_1 \cos \alpha - G_2 \cos \beta; \quad (17)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m_1}{r_1^2} \frac{(r + D_1 \sin \varepsilon)}{r_1} - \mu_0 \frac{m_2}{r_2^2} \frac{(r - D_2 \sin \varepsilon)}{r_2}; \quad (18)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m_1 r}{r_1^3} - \mu_0 \frac{m_1 D_1 \sin \varepsilon}{r_1^3} - \mu_0 \frac{m_2 r}{r_2^3} + \mu_0 \frac{m_2 D_2 \sin \varepsilon}{r_2^3}; \quad (19)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 r \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_2}{r_2^3} \right) + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right); \quad (20)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 r \left(\frac{m_1}{r_1^3} + \frac{m_1}{r^3} - \frac{m_1}{r^3} + \frac{m_2}{r_2^3} + \frac{m_2}{r^3} - \frac{m_2}{r^3} \right) + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right); \quad (21)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \mu_0 r m_1 \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r_1^3} \right) - \mu_0 r m_2 \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r^3} \right) + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right). \quad (22)$$

По теореме косинусов

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} &= \frac{1}{r^3} \left(\frac{r^2 + D_2^2 - (-2rD_2 \cos(\pi/2 - \varepsilon))}{r^2} \right)^{-3/2} - \\ &= \frac{1}{r^3} \left(\frac{r^2 + D_1^2 - 2rD_1 \cos(\pi/2 + \varepsilon)}{r^2} \right)^{-3/2} = \\ &= \frac{1}{r^3} \left[\left(1 - \frac{2D_2 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_2^2}{r^2} \right)^{-3/2} - \right. \\ &\quad \left. - \left(1 + \frac{2D_1 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_1^2}{r^2} \right)^{-3/2} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

и применяя формулу бинома Ньютона с сохранением в разложении слагаемых первого порядка малости, полагая $D \ll r$:

$$\left(1 - \frac{2D_2 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_2^2}{r^2}\right)^{-3/2} \cong 1 + \frac{3D_2 \sin \varepsilon}{r} - \frac{3D_2^2}{2r^2}; \quad (24)$$

$$\left(1 + \frac{2D_1 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_1^2}{r^2}\right)^{-3/2} \cong 1 - \frac{3D_1 \sin \varepsilon}{r} - \frac{3D_1^2}{2r^2}, \quad (25)$$

получаем

$$\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \cong \frac{3D \sin \varepsilon}{r^4} + \frac{3(D_1^2 - D_2^2)}{2r^5}. \quad (26)$$

Аналогично

$$\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r_1^3} = \frac{1}{r^3} \left[1 - \left(1 + \frac{2D_1 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_1^2}{r^2} \right)^{-3/2} \right]; \quad (27)$$

$$\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r_1^3} \cong \frac{3D_1 \sin \varepsilon}{r^4} + \frac{3D_1^2}{2r^5}. \quad (28)$$

А также

$$\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r^3} = \frac{1}{r^3} \left[\left(1 - \frac{2D_2 \sin \varepsilon}{r} + \frac{D_2^2}{r^2} \right)^{-3/2} - 1 \right]; \quad (29)$$

$$\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r^3} \cong \frac{3D_2 \sin \varepsilon}{r^4} - \frac{3D_2^2}{2r^5}. \quad (30)$$

Из (16), (26) и (9) получаем уравнение для проекции главного вектора сил на ось Cx :

$$F_{Cx} = \mu_0 m_1 D_1 \cos \varepsilon \frac{3D \sin \varepsilon}{r^4} + \mu_0 m_1 D_1 \cos \varepsilon \frac{3(D_1^2 - D_2^2)}{2r^5}. \quad (31)$$

Без учета слагаемого самого высокого порядка малости

$$F_{Cx} = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} \sin 2\varepsilon. \quad (32)$$

Из выражений (22), (26), (28), (30) и (9) последовательно получаем уравнение для проекции главного вектора сил на ось Cy :

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \mu_0 r m_1 \frac{3D_1 \sin \varepsilon}{r^4} - \mu_0 r m_2 \frac{3D_2 \sin \varepsilon}{r^4} + \mu_0 \frac{3(m_1 D_1^2 + m_2 D_2^2)}{2r^4} + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \frac{3D \sin \varepsilon}{r^4} + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \frac{3(D_1^2 - D_2^2)}{2r^5}; \quad (33)$$

и без учета слагаемого самого высокого порядка малости

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \mu_0 \frac{3(m_1 D_1^2 + m_2 D_2^2)}{2r^4} + \mu_0 m_1 D_1 \sin \varepsilon \frac{3D \sin \varepsilon}{r^4}; \quad (34)$$

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} + 3\mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} \sin^2 \varepsilon. \quad (35)$$

Система двух сил, определяемых уравнениями (32) и (35), эквивалента следующей системе сил:

$$G = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2}; \quad (36)$$

$$F_T = 3\mu_0 \frac{m D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1 + \eta)^2} \sin \varepsilon, \quad (37)$$

где G – сила гравитационного притяжения, приложенная в центре масс C , направленная вдоль местной вертикали в сторону центра притяжения O ; F_T – сила тяги в центре масс C , направленная вдоль гантели в сторону массы m_1 при $\sin \varepsilon > 0$ или в сторону m_2 при $\sin \varepsilon < 0$ (рис. 2).

Сила притяжения G равна силе гравитационного притяжения материальной точки с массой m , равной массе гантели, с добавлением слагаемого второго порядка малости, величина которого зависит от размера гантели D и соотношения масс η . F_T – дополнительная сила, обусловленная разностью гравитационного притяже-

ния концевых масс гантели, своего рода управляемая сила тяги: ε , D и η – параметры управления силой тяги F_T . Максимальное значение модуля силы тяги F_T имеет место при ориентации гантели вдоль местной вертикали и равном соотношении концевых масс гантели ($\eta = 1$).

1.2. Определение главного момента системы сил

Определим модуль главного момента системы сил $M_C(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2)$. По теореме Вариньона (теорема о моменте равнодействующей) с учетом (2), (5), (8), (9), (13) и (26) последовательно получим уравнение для модуля главного момента системы сил:

$$M_C = G_1 \sin \alpha D_1 \sin \varepsilon - G_1 \cos \alpha D_1 \cos \varepsilon + G_2 \sin \beta D_2 \sin \varepsilon + G_2 \cos \beta D_2 \cos \varepsilon; \quad (38)$$

$$M_C = G_1 D_1 (\sin \alpha \sin \varepsilon - \cos \alpha \cos \varepsilon) + G_2 D_2 (\sin \beta \sin \varepsilon + \cos \beta \cos \varepsilon); \quad (39)$$

$$M_C = \mu_0 \frac{m_1}{r_1^2} D_1 (\sin \alpha \sin \varepsilon - \cos \alpha \cos \varepsilon) + \mu_0 \frac{m_2}{r_2^2} D_2 (\sin \beta \sin \varepsilon + \cos \beta \cos \varepsilon); \quad (40)$$

$$M_C = \mu_0 m_1 D_1 \times \left[\frac{\sin \alpha \sin \varepsilon - \cos \alpha \cos \varepsilon}{r_1^2} + \frac{\sin \beta \sin \varepsilon + \cos \beta \cos \varepsilon}{r_2^2} \right]; \quad (41)$$

$$M_C = \mu_0 m_1 D_1 \times \left(\frac{D_1}{r_1^3} \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \frac{r + D_1 \sin \varepsilon}{r_1^3} \cos \varepsilon + \frac{D_2}{r_2^3} \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \frac{r - D_2 \sin \varepsilon}{r_2^3} \cos \varepsilon \right); \quad (42)$$

$$M_C = \mu_0 m_1 D_1 r \cos \varepsilon \left(\frac{1}{r_2^3} - \frac{1}{r_1^3} \right); \quad (43)$$

$$M_C \cong \mu_0 m_1 D_1 \cos \varepsilon \frac{3D \sin \varepsilon}{r^3}; \quad (44)$$

$$M_C = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m_1 D_1 D}{r^3} \sin 2\varepsilon; \quad (45)$$

$$M_C = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{m_1 D_1 (D_1 + D_2)}{r^3} \sin 2\varepsilon; \quad (46)$$

$$M_C = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{(m_1 D_1^2 + m_2 D_2^2)}{r^3} \sin 2\varepsilon; \quad (47)$$

$$M_C = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{J_D}{r^3} \sin 2\varepsilon, \quad (48)$$

где

$$J_D = m_1 D_1^2 + m_2 D_2^2. \quad (49)$$

Максимальное значение модуля момента M_C соответствует ориентации гантели для угла $\varepsilon = \pi/4$ и $\varepsilon = 3\pi/4$.

1.3. Уравнения движения центра масс гантели

Основной закон динамики для движения центра масс гантели C в абсолютной системе координат

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F}_C, \quad (50)$$

где \mathbf{a} – ускорение центра масс гантели.

Запишем уравнение (50) в полярной системе координат (r, ϑ) (рис. 2):

$$m(\ddot{r} - \dot{\vartheta}^2 r) = F_{Cy}; \quad (51)$$

$$m(r\ddot{\vartheta} + 2\dot{r}\dot{\vartheta}) = -F_{Cx}. \quad (52)$$

С учетом (32) и (35) получим уравнения движения центра масс гантели C в полярной системе координат (r, ϑ) :

$$\ddot{r} - \dot{\vartheta}^2 r = -\frac{\mu_0}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right); \quad (53)$$

$$r\ddot{\vartheta} + 2\dot{r}\dot{\vartheta} = -\frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \sin 2\varepsilon. \quad (54)$$

Система уравнений (53) и (54) включает угол ε , значение которого определим при рассмотрении уравнений движения гантели относительно центра масс C .

1.4. Уравнения движения гантели относительно центра масс

Рассмотрим движение точечной концевой массы гантели m_1 в неинерциальной системе координат Cx_1y_1 , связанной с гантелью: ось Cx_1 направ-

лена вдоль вектора D_1 в сторону концевой массы гантели m_1 , ось Cy_1 – в плоскости движения гантели перпендикулярно оси Cx_1 (рис. 3). Основное уравнение динамики в неинерциальной системе координат Cx_1y_1 в векторном виде

$$m_1 \mathbf{a}_{1r} = \mathbf{G}_1 + \mathbf{T}_1 + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_c, \quad (55)$$

где \mathbf{a}_{1r} – относительное ускорение концевой массы гантели m_1 в Cx_1y_1 (в случае жесткой гантели $D = \text{const}$, $\mathbf{a}_{1r} = 0$); \mathbf{T}_1 – сила реакции невесомого стержня, направленная вдоль стержня (рис. 3); \mathbf{F}_e – переносная сила инерции; \mathbf{F}_c – кориолисова сила инерции.

$$\mathbf{F}_e = -m_1 \mathbf{a}_{1e}. \quad (56)$$

Переносное ускорение \mathbf{a}_{1e} относительно полюса C

$$\mathbf{a}_{1e} = \mathbf{a}_c + \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n, \quad (57)$$

где \mathbf{a}_τ – касательное ускорение концевой массы гантели m_1 относительно полюса C , направлено вдоль оси Cy_1 ;

$$a_\tau = (\ddot{\varepsilon} + \dot{\vartheta}) D_1; \quad (58)$$

\mathbf{a}_n – нормальное ускорение концевой массы гантели m_1 относительно полюса C , направлено вдоль оси Cx_1 в сторону полюса C ;

$$a_n = (\dot{\varepsilon} + \dot{\vartheta})^2 D_1. \quad (59)$$

Ускорение полюса C :

$$\mathbf{a}_c = \mathbf{a}_{cr} + \mathbf{a}_{c\vartheta}; \quad (60)$$

где \mathbf{a}_{cr} – радиальное ускорение полюса C , направлено вдоль оси Cy ;

$$a_{cr} = \frac{F_{cy}}{m} = -\frac{\mu_0}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right); \quad (61)$$

$\mathbf{a}_{c\vartheta}$ – поперечное ускорение полюса C , направлено вдоль оси Cx ;

$$a_{c\vartheta} = \frac{F_{cx}}{m} = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \sin 2\varepsilon. \quad (62)$$

$$\mathbf{F}_c = -m_1 \mathbf{a}_{1c}, \quad (63)$$

где \mathbf{a}_{1c} – ускорение Кориолиса равно 0, так как скорость изменения расстояния $\dot{D}_1 = 0$:

$$a_{1c} = 2 (\dot{\varepsilon} + \dot{\vartheta}) \dot{D}_1. \quad (64)$$

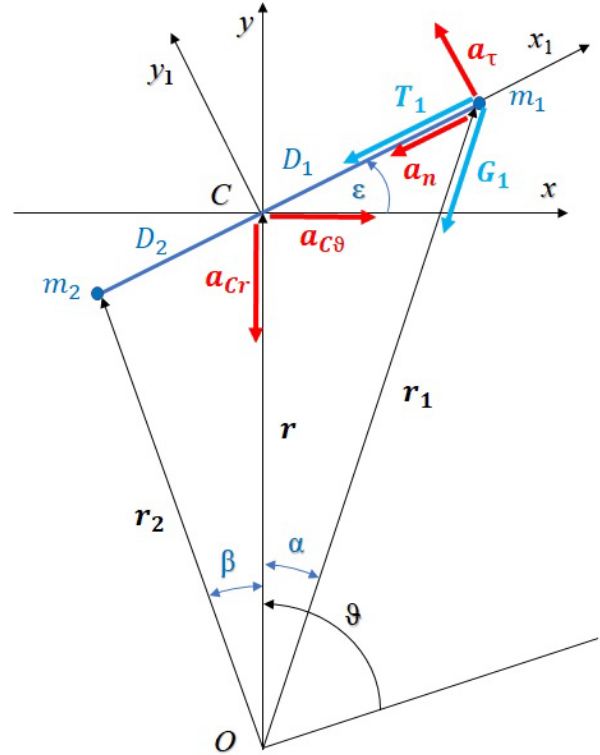


Рис. 3. Движение гантели в неинерциальной системе координат Cx_1y_1
Figure 3. Movement of a dumbbell in a non-inertial coordinate system Cx_1y_1

Уравнение (55) в проекциях на ось Cx_1 :

$$0 = -G_{1x1} - T_1 + F_{ex1}; \quad (65)$$

в проекциях на ось Cy_1 :

$$0 = -G_{1y1} + F_{ey1}, \quad (66)$$

где

$$-G_{1y1} = G_{1x} \sin \varepsilon - G_{1y} \cos \varepsilon \quad (67)$$

или с учетом (5), (6), (8), (12) и (13)

$$\begin{aligned} -G_{1y1} &= \mu_0 \frac{m_1 D_1}{r_1^2 r_1} \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \\ &- \mu_0 \frac{m_1 (r + D_1 \sin \varepsilon)}{r_1^2 r_1} \cos \varepsilon \end{aligned} \quad (68)$$

и приведем подобные

$$-G_{1y1} = -\mu_0 \frac{m_1 r}{r_1^3} \cos \varepsilon, \quad (69)$$

а проекция переносной силы инерции

$$F_{ey1} = -m_1(-a_{Cr} \cos \varepsilon - a_{C\theta} \sin \varepsilon + a_{\tau}) \quad (70)$$

с учетом (61), (62), (58)

$$\times \left(\begin{array}{l} F_{ey1} = -m_1 \times \\ -\mu_0 \frac{\cos \varepsilon}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right) \cos \varepsilon - \\ -\frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \sin 2\varepsilon \sin \varepsilon + (\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}) D_1 \end{array} \right) \quad (71)$$

в итоге получаем

$$F_{ey1} = -m_1 \left(-\mu_0 \frac{\cos \varepsilon}{r^2} + \frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \cos \varepsilon + (\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}) D_1 \right). \quad (72)$$

С учетом (69) и (71) уравнение (66) примет вид

$$0 = -\mu_0 \frac{m_1 r}{r_1^3} \cos \varepsilon - m_1 \left(-\mu_0 \frac{\cos \varepsilon}{r^2} + \frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \cos \varepsilon + (\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}) D_1 \right); \quad (73)$$

а приведем подобные

$$(\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}) D_1 = \mu_0 r \cos \varepsilon \left(\frac{1}{r^3} - \frac{1}{r_1^3} - \frac{3 D^2}{2 r^5} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \right) \quad (74)$$

и принимая во внимание (28) окончательно получим

$$\ddot{\varepsilon} = \frac{3}{2} \mu_0 \frac{\sin 2\varepsilon}{r^3} + \frac{D}{r^4} \frac{(\eta-1)}{(1+\eta)} \cos \varepsilon - \ddot{\theta}. \quad (75)$$

Уравнение (75) может быть также получено на основе уравнения главного момента системы сил (43)

$$M_C = J_D (\ddot{\varepsilon} + \ddot{\theta}). \quad (76)$$

1.5. Математическая модель движения гантели

Из (55), (56), (76) запишем систему дифференциальных уравнений движения гантели

$$\begin{aligned} \ddot{r} - \dot{\theta}^2 r &= -\frac{\mu_0}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right); \\ r \ddot{\theta} + 2\dot{r} \dot{\theta} &= -\frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \sin 2\varepsilon; \\ \ddot{\varepsilon} &= \frac{3}{2} \mu_0 \frac{\sin 2\varepsilon}{r^3} + \frac{D}{r^4} \frac{(\eta-1)}{(1+\eta)} \cos \varepsilon - \ddot{\theta}. \end{aligned} \quad (77)$$

Анализ правых частей уравнения движения центра масс показывает, что движение центра масс гантели отличается от движения по кеплеровской траектории и зависит от длины стержня гантели и изменения угла ее наклона к местному горизонту.

2. Движение твердой гантели с маховиком

В центральном поле силы тяготения существует взаимосвязь вращательного движения относительно центра масс тела и радиального движения тела [11; 14; 15]. Факт взаимосвязи вращательного движения вокруг центра масс и радиального движения наблюдается в природе. Ежегодно Луна удаляется от Земли на 3,8 см, при этом Земля замедляет свою угловую скорость вращения [16].

Изменение полного кинетического момента гантели K_O относительно центра O равно главному моменту внешних сил M_O (теорема об изменении кинетического момента):

$$\frac{dK_O}{dt} = M_O. \quad (78)$$

Моменты сил притяжения G_1 и G_2 относительно центра O равны нулю, следовательно

$$M_O = 0, \quad (79)$$

а кинетический момент гантели K_O – величина постоянная. Полный кинетический момент гантели запишем в виде суммы:

$$K_O = K_e + K_i, \quad (80)$$

где K_e – вектор кинетического момента центра масс гантели C , в котором сосредоточена вся масса гантели, относительно центра O ; K_i – вектор кинетического момента вращения гантели относительно центра масс C .

$$K_e = m r V, \quad (81)$$

где m – масса гантели ($m = m_1 + m_2$); \mathbf{r} – радиус-вектор центра масс гантели до притягивающего центра O ; \mathbf{V} – вектор скорости центра масс C гантели.

$$\mathbf{K}_i = J_D \boldsymbol{\Omega}, \quad (82)$$

где J_D – момент инерции гантели в плоскости движения относительно центра C , центральный осевой (бинормальный) момент инерции; $\boldsymbol{\Omega}$ – абсолютная угловая скорость вращения гантели.

Для сохранения заданного положения гантели под углом ε требуется уравнивающий момент \mathbf{M}_J ($-\mathbf{M}_C = \mathbf{M}_J$), который можно создать с использованием маховика [11]. Силы инерции маховика приводятся к паре сил с моментом

$$\mathbf{M}_J = -J \dot{\boldsymbol{\omega}}, \quad (83)$$

где J – момент инерции маховика; $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ – угловое ускорение вращения маховика.

Таким образом, система уравнений (77) с поддерживающим углом ε маховиком массы m_J принимает вид

$$\ddot{r} - \dot{\theta}^2 r = -\frac{\mu_0}{r^2} + 3\mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \left(\frac{1}{2} + \sin^2 \varepsilon \right) \frac{m}{(m+m_J)};$$

$$r \ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} = -\frac{3}{2} \mu_0 \frac{D^2}{r^4} \frac{\eta}{(1+\eta)^2} \frac{m}{(m+m_J)} \sin 2\varepsilon;$$

$$\varepsilon = \text{const}. \quad (84)$$

На основе системы уравнений (86) проведено математическое моделирование изменения радиуса $\Delta r = r_0 - r$ на двух витках орбиты при начальных условиях: $r_0 = 6\,675$ км, $\dot{\theta}_0 = 0,001157689$ с⁻¹, $D = 100$ км, $\eta = 1$, $m = m_J$ (рис. 3). В случае $\varepsilon = 3\pi/4$ произошло увеличение r на 7 км за один виток, а в случае $\varepsilon = \pi/4$ – уменьшение на 7 км.

В итоге, раскручивая маховик до некоторой угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$, изменяется кинетический момент \mathbf{K}_i , а следовательно, и кинетический момент \mathbf{K}_e центра масс гантели C . Ограничение на максимальное изменение \mathbf{K}_e обусловлено предельной угловой скоростью вращения маховика.

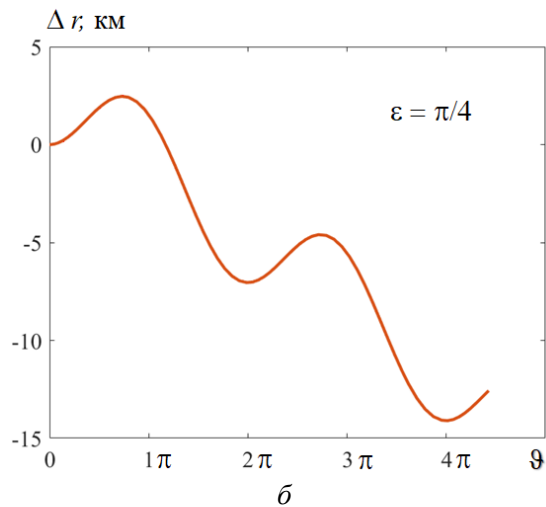
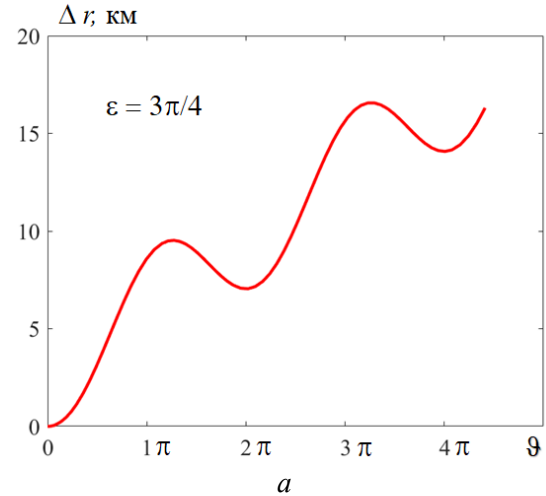


Рис. 4. Изменение радиального перемещения центра масс гантели:
a – увеличение энергетики орбиты; *б* – уменьшение энергетики орбиты
Figure 4. Change in the radial displacement of the dumbbell mass center:
a – an increase in the energy of the orbit; *б* – decrease in energy of the orbit

На рис. 4 представлена схема радиального перемещения центра масс гантели C . Путем изменения направления вращения маховиков движение системы возможно осуществлять вверх при ориентации гантели к местному горизонту под углом $\varepsilon = 3\pi/4$ (рис. 4, *a*) и вниз – при $\varepsilon = \pi/4$ (рис. 4, *б*). Предел перемещения ограничен максимальной угловой скоростью вращения маховика. Имея группировку маховиков с разными высотами орбит в одной плоскости возможно реализовать схему передвижения встречных грузопотоков без расхода топлива. Для раскрутки маховиков достаточно электроэнергии от источников питания (например, солнечных батарей).

При этом изменение энергетике орбиты движения центра масс гантели равно работе сил инерции маховика.

Таким образом, достаточно наглядно показан нереактивный принцип перемещения центра масс протяженного тела в центральном гравитационном поле, основанный на внутреннем перераспределении полного кинетического момента тела между кинетическими моментами центра масс тела и относительно центра масс тела.

Необходимость использования маховика исключается в нереактивном принципе движения, предложенном в работах В.В. Белецкого [8; 10].

3. Гравилет Белецкого – Гиверца

Гантель ориентирована вдоль оси Cz орбитальной системы координат $Cxyz$ (рис. 5), концевые массы гантели равны ($\eta = 1$, $m_1 = m_2$, $D_1 = D_2$, $r_1 = r_2$, $\alpha = \beta$). Главный вектор системы сил притяжения F_C определяется уравнением (1). Главный момент системы сил относительно центра масс гантели $M_C(G_1, G_2)$ равен нулю.

Запишем уравнение (1) в проекциях на оси орбитальной системы координат $Cxyz$.

$$F_{Cx} = 0; \tag{85}$$

$$F_{Cy} = G_{1y} + G_{2y}; \tag{86}$$

$$F_{Cz} = 0. \tag{87}$$

В данном случае $\varepsilon = 0$ и выражение (35) примет вид

$$F_{Cy} = -\mu_0 \frac{m}{r^2} + \frac{3}{8} \mu_0 \frac{mD^2}{r^4}. \tag{88}$$

Главный вектор системы сил F_C эквивалентен системе сил:

$$F_C = G^* + F_T^*, \tag{89}$$

где G^* – сила гравитационного притяжения, приложенная в центре масс C , направленная вдоль местной вертикали в сторону центра притяжения O :

$$G^* = -\mu_0 \frac{m}{r^2}; \tag{90}$$

F_T^* – сила тяги в центре масс C , направленная вверх вдоль местной вертикали (рис. 5):

$$F_T^* = \frac{3}{8} \mu_0 \frac{mD^2}{r^4}. \tag{91}$$

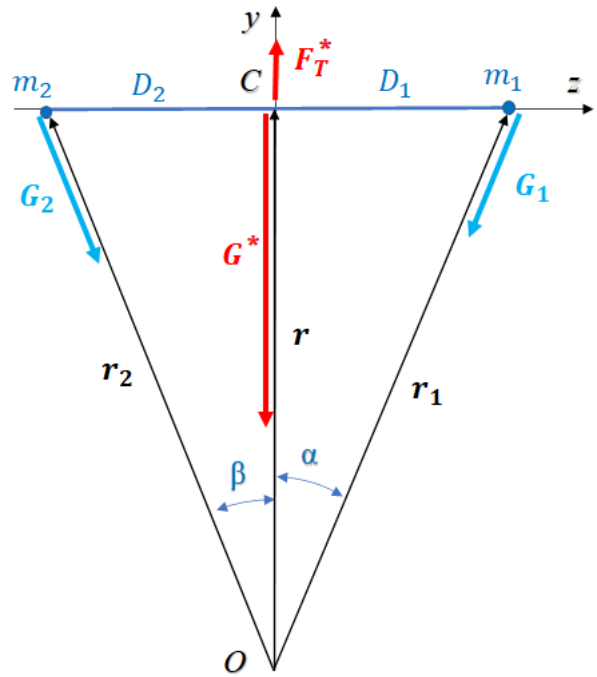


Рис. 5. Эквивалентные системы сил при горизонтальном расположении гантели перпендикулярно плоскости орбиты
Figure 5. Equivalent systems of forces with a horizontal dumbbell position perpendicular to the plane of the orbit

Сила притяжения G^* равна силе гравитационного притяжения материальной точки с массой m , равной массе гантели; F_T^* – дополнительная сила с параметром управления D , обусловленная разностью гравитационного притяжения концевых масс гантели.

Запишем систему уравнений движения гантели в полярной системе координат (r, ϑ) (рис. 5):

$$\begin{aligned} \ddot{r} - \dot{\vartheta}^2 r &= -\mu_0 \frac{1}{r^2} + \frac{3}{8} \mu_0 \frac{D^2}{r^4}, \\ r\ddot{\vartheta} + 2\dot{r}\dot{\vartheta} &= 0. \end{aligned} \tag{92}$$

При постоянной длине штанги гантели D сила тяги F_T^* – постоянна, и изменение радиуса орбиты центра масс гантели за полный виток не происходит. Однако если изменять длину штанги D , то получаем изменение силы тяги F_T^* . Так,

при движении центра масс гантели с начальными условиями $r_0 = 6\,675$ км, $\dot{\theta}_0 = 0,001157689$ с⁻¹, $D = 100$ км за первые полвитка происходит увеличение радиуса орбиты на 4,5 км, затем штанга гантели сворачивается ($D = 0$), сила тяги $F_T^* = 0$ и движение на второй половине витка происходит по кеплеровской орбите. То есть принцип движения гравилета Белецкого – Гиверца состоит в применении «пульсирующей» длины штанги гантели: для увеличения энергетики орбиты движение на участке от апоцентра к перигею происходит с развернутой штангой гантели, а на участке от перигея до апоцентра – в свернутом положении. И наоборот, для уменьшения энергетики орбиты движение на участке от перигея к апоцентру происходит с развернутой штангой гантели, а на участке от апоцентра до перигея – в свернутом положении. При этом механическая энергия, затрачиваемая на изменение длины штанги гантели, равна изменению энергетики орбиты.

4. Практическая реализация неактивного принципа движения

Движение твердой гантели с маховиком подтверждает возможность реализации неактивного принципа движения протяженного тела в центральном гравитационном поле. Однако большая протяженность тела и проблема предела насыщения маховика затрудняют практическую реализацию данного механического принципа движения. Применение спина элементарных частиц, используемых в качестве маховиков, позволяет обойти указанные ограничения. Излучение элементарных частиц происходит в плоскости перпендикулярной движению тела. В строгом соответствии с законами классической и квантовой механики предложена концепция реализации данного принципа движения [14; 15; 17]. Показано, что принцип движения, основанный на использовании спина низкоэнергетических элементарных частиц, эффективнее фотонной ракеты. Например, применение спина гравитона для движения тел в миллиард раз эффективнее применения гравитона для реактивного движения. Доказана возможность достижения ускорения телом более 6600 м/с² без перегрузки.

Применение спина гравитона для движения тел требует теорию, в которой гравитация и связанная с ней геометрия пространства – времени описываются на языке квантовой физики. Несмот-

ря на значительные усилия в настоящее время нет полной и непротиворечивой теории квантовой гравитации, хотя существует ряд многообещающих кандидатов. Основной проблемой подтверждения предлагаемых теорий являются сложности с проведением экспериментов по поиску низкоэнергетических частиц [18; 19].

Известные эксперименты с гравитацией проводились в основном по двум направлениям [20]: 1) измерение силы гравитационного притяжения между материальными телами [21–25]; 2) измерения гравитационных волн (изменения гравитационного поля, пространства – времени) [26; 27] – и не связаны с регистрацией потоков низкоэнергетических частиц, взаимодействующих с материальными телами. Подобное взаимодействие наблюдается в астрофизике (феномен «темной материи») [28], в аномалиях облета Земли космическими аппаратами [29]. Предлагается при проведении указанных и подобных экспериментов обращать внимание на наличие шумов в измерениях, обусловленных присутствием движения массивных материальных объектов, а также изменения их угловой скорости вращения.

Исходя из исследованного в данной работе неактивного движения протяженного тела в центральном гравитационном поле, можно предположить, что устройство, создающее тягу без расхода массы, должно обеспечивать «пульсирующие» колебания рабочего тела и прием полезного потока низкоэнергетических элементарных частиц, обладающих спином.

Заключение

Теоретически доказана возможность создания тяги, основанной на изменении кинетического момента.

Практическая реализация идеи требует дополнительных фундаментальных исследований и экспериментального подтверждения потоков низкоэнергетических элементарных частиц, обладающих спином.

Устройства создающие тягу без расхода массы должны обеспечивать высокочастотные колебания рабочего тела и прием полезного потока низкоэнергетических элементарных частиц, обладающих спином.

Полученные результаты могут быть использованы в экспериментах для поиска низкоэнергетических элементарных частиц и разработки транспортных объектов на новых физических принципах.

Список литературы / References

1. Dorfman YaG. *World history of physics: from ancient times to the end of the 18th century*. Moscow: LKI Publ.; 2010. (In Russ.)

Дорфман Я.Г. Всемирная история физики: с древнейших времен до конца XVIII века. М.: ЛКИ, 2010. 352 с.

2. Etkin VA. About the possibility of creating “self-moving” devices. *Problems of Science*. 2019;(4(40)):6–16. (In Russ.)

Эткин В.А. О возможности создания «самодвижущихся» устройств // Проблемы науки. 2019. № 4(40). С. 6–16.

3. Tajmar M. Biefeld – Brown effect: misinterpretation of corona wind phenomena. *AIAA Journal*. 2004;42(2): 315–318. <https://doi.org/10.2514/1.9095>

4. Tolchin VN. *Inertoid. Inertia forces as a source of translational motion*. Perm; 1977. (In Russ.)

Толчин В.Н. Инертоид. Силы инерции как источник поступательного движения. Пермь, 1977. 99 с.

5. Dubinsky MG. Why the Dina apparatus cannot fly. *Technika – Molodezhi*. 1963;(3):32. (In Russ.)

Дубинский М.Г. Почему не может летать аппарат «Дина» // Техника – молодежи. 1963. № 3. С. 32.

6. Melnikov VP. *Anomalous aircraft – transport of the future*. Moscow: Buki Vedi Publ.; 2016. (In Russ.)

Мельников В.П. Аномальные летательные аппараты – транспорт будущего. М.: Буки Веди, 2016. 416 с.

7. Shawyer R. Second generation EmDrive propulsion applied to SSTO launcher and interstellar probe. *Acta Astronaut*. 2015;116:166–174. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.07.002>

8. Beletsky VV. *Essays on the motion of cosmic bodies*. 3rd ed. Moscow: LKI Publ.; 2009. (In Russ.)

Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. 3-е изд. М.: Изд-во ЛКИ, 2009. 432 с.

9. Beletsky VV, Levin EM. *Dynamics of space cable systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1990. (In Russ.)

Белецкий В.В., Левин Е.М. Динамика космических тросовых систем. М.: Наука, 1990. 330 с.

10. Beletsky VV, Giverts ME. On the motion of a pulsating system in a gravitational field. *Space Research*. 1968;6(2):304–306. (In Russ.)

Белецкий В.В., Гиверц М.Е. О движении пульсирующей системы в гравитационном поле // Космические исследования. 1968. Т. 6. № 2. С. 304–306.

11. Pirozhenko AV. Controlled motion of a bundle of two bodies in a Newtonian field of forces by changing the bond length. *Space Research*. 1990;304:473–482. (In Russ.)

Пироженко А.В. Управляемое движение связки двух тел в ньютоновском поле сил изменением длины связи // Космические исследования. 1990. Т. 30. № 4. С. 473–482.

12. Okunev YuM. On the possible movements of a long dumbbell in the central field of forces. *Space Research*. 1969;7(5):637–642. (In Russ.)

Окунев Ю.М. О возможных движениях длинной гантели в центральном поле сил // Космические исследования. 1969. Т. 7. № 5. С. 637–642.

13. Okunev YuM. On the translational-rotational movement of a long dumbbell (dissertation of the Candidate of Physical and Mathematical Sciences). Moscow; 1971. (In Russ.)

Окунев Ю.М. О поступательно-вращательном движении длинной гантели: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1971. 111 с.

14. Razoumny YN, Kupreev SA. On the motion of bodies based on changes in the kinetic moment. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2019;20(4):267–275. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-267-275>

Разумный Ю.Н., Купреев С.А. О движении тел на основе изменения кинетического момента // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 4. С. 267–275. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-267-275>

15. Spencer DB, Razoumny YuN, Kupreev SA. Principle of motion based on the kinetic moment. *Advances in the Astronautical Sciences*. 2021;174:301–307.

16. Murray CD, Dermott SF. *Solar system dynamics*. Cambridge University Press; 1999.

17. Kupreev SA, Razoumny YuN. *The concept of creating thrust based on change angular momentum*. 2021. arXiv:2105.10775v6. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.10775>

18. Kumar SP, Plenio MB. On quantum gravity tests with composite particles. *Nature Communications*. 2020; 1:e3900. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17518-5>

19. Wood BD, Stimpson GA, March JA, Lekhai YND, Stephen CJ, Green BL, Frangskou AC, Ginés L, Mandal S, Williams OA, Bose S, Morley GW. *Matter and spin superposition in vacuum experiment (MASSIVE)*. 2021. arXiv:2105.02105.

20. Tino GM. Testing gravity with cold atom interferometry: results and prospects. *Quantum Science and Technology*. 2021;6(2):024014. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/abd83e>
21. Westphal T, Hepach H, Pfaff J, Aspelmeyer M. Measurement of gravitational coupling between millimetre-sized masses. *Nature*. 2021;591(7849):225–228. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03250-7>
22. Duan XC. Test of the universality of free fall with atoms in different spin orientations. *Physical Review Letters*. 2016;117(2):023001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.023001>
23. Caravita R, Aghion S, Amsler C, Antonello M, Belov A, Bonomi G, Brusa RS, Caccia M, Camper A, Castelli F, Cerchiari G, Comparat D, Consolati G, Demetrio A, Di Noto L, Doser M, Evans C, Fani M, Ferragut R, Fesel J, Fontana A, Gerber S, Giammarchi M, Gligorova A, Guatieri F, Hackstock P, Haider S, Hinterberger A, Holmestad H, Kellerbauer A, Khalidova O, Krasnický D, Lagomarsino V, Lansonneur P, Lebrun P, Malbrunot C, Mariazzi S, Marton J, Matveev V, Muller SR, Nebbia G, Nedelec P, Oberthaler M, Pagano D, Penasa L, Petracek V, Prezl F, Prevedelli M, Rienäcker B, Robert J, Rohne OM, Rotondi A, Sandaker H, Santoro R, Smestad L, Sorrentino F, Testera G, Tietje I, Vujanovic M, Widmann E, Yzombard P, Zimmer C, Zmeskal J, Zurlo N. The AEGIS experiment at CERN: probing antimatter gravity. *Nuovo Cimento C-Colloquia and Communications in Physics*. 2019;42(2–3):123. <https://doi.org/10.1393/ncc/i2019-19123-9>
24. Asenbaum P, Overstreet C, Kim M, Curti J, Kasevich MA. Atom-interferometric test of the equivalence principle at the 10–12 level. *Physical Review Letters*. 2020;125(19):191101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.191101>
25. Provatidis CG. Free fall of a symmetrical gyroscope in vacuum. *European Journal of Physics*. 2021;42(6):065011. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac1e7b>
26. Abbott BP. Tests of general relativity with GW150914. *Physical Review Letters*. 2016;116(22):221101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101>
27. Cervantes-Cota J, Galindo-Uribarri S, Smoot G. A brief history of gravitational waves. *Universe* 2016;2(3):22. <https://doi.org/10.3390/universe2030022>
28. Aleksandrov AB, Dashkina AB, Konovalova NS, Okateva NM, Polukhina NG, Starkov NI, Tioukov VE, Chernyavsky MM, ShchedrinaTV. Search for weakly interacting massive dark matter particles: state of the art and prospects. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2021;191(9):905–936. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.11.038872>
29. Anderson JD, Campbell JK, Ekelund JE, Ellis J, Jordan JF. Anomalous orbital-energy changes observed during spacecraft flybys of earth. *Physical Review Letters*. 2008;100(9):091102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.091102>

Сведения об авторах

Купреев Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8657-2282, Scopus Author ID: 57201885865, eLIBRARY SPIN-код: 2287-2902; kupreev-sa@rudn.ru

Мельников Виталий Михайлович, академик Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Международной академии информатизации, доктор технических наук, профессор департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-2114-7891, Scopus Author ID: 16646368100, eLIBRARY AuthorID: 185305; vitalymelnikov45@yandex.ru

Самусенко Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, директор департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация; 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8350-9384, eLIBRARY SPIN-код: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

Бондаренко Юрий Александрович, магистрант, департамент механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-8639-7202; 1032162828@rudn.ru

Яблоновский Павел Алексеевич, магистрант, департамент механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-3300-0723; 1032160153@rudn.ru

About the authors

Sergei A. Kupreev, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8657-2282, e-LIBRARY SPIN-code: 2287-2902; kupreev-sa@rudn.ru

Vitaly M. Melnikov, Academician of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics and International Academy of Informatization, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2114-7891, Scopus Author ID: 16646368100, eLIBRARY AuthorID: 185305; vitalymelnikov45@yandex.ru.

Oleg E. Samusenko, Ph.D of Technical Sciences, Head of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8350-9384, eLIBRARY SPIN-code: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

Yuri A. Bondarenko, master student, Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8639-7202; 1032162828@rudn.ru

Pavel A. Yablonovsky, master student, Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3300-0723; 1032160153@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-97-107
УДК 004.85

Научная статья / Research article

Современные аспекты применения искусственного интеллекта для прогнозирования стихийных бедствий на реках Российской Федерации (на примере реки Амур)

Н.Э. Александров^a  , Д.Н. Ермаков^{a,b} ,
А.Е. Бром^c , И.Н. Омельченко^c , С.В. Шкодинский^{a,d} 

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bАО «НИИ „Полнос“ имени М.Ф. Стельмаха», Москва, Российская Федерация

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

^dМосковский государственный областной университет, Мытищи, Российская Федерация

✉ 1042210208@rudn.university

История статьи

Поступила в редакцию: 10 марта 2022 г.

Доработана: 28 мая 2022 г.

Принята к публикации: 4 июня 2022 г.

Ключевые слова:

управление катастрофами, предсказание паводков, река Амур, машинное обучение, линейная регрессия, нейронная сеть, градиентный бустинг

Аннотация. Среди всех наблюдаемых природных стихийных бедствий катастрофы, связанные с водой, наиболее частые и несут серьезную опасность для людей и социально-экономического развития. Для России наибольшую актуальность представляют речные паводки, важность борьбы с которыми, в частности на Дальнем Востоке, неоднократно подчеркивал президент РФ В.В. Путин. Изучено качество работы различных методов искусственного интеллекта по предсказанию речных паводков в бассейне реки Амур. Уникальность исследования заключается в том, что прежде подобных изысканий для этой реки не проводилось. Основная задача состояла в последующем практическом применении полученных результатов в системах прогнозирования паводков и управления их риском. С этой целью поиск наилучшего метода выполнялся среди широко используемых на рынке методов, обладающих богатым выбором вспомогательных решений: градиентный бустинг на деревьях, линейная регрессия без регуляризации и нейронные сети. В дизайне исследования сделан упор на достижение максимальной воспроизводимости результатов. В итоге наивысшее качество показал градиентный бустинг над деревьями в отечественной реализации CatBoost. Полученные результаты могут быть экстраполированы и на другие реки, сравнимые как по площади, так и по объему собранных данных.

Для цитирования

Александров Н.Э., Ермаков Д.Н., Бром А.Е., Омельченко И.Н., Шкодинский С.В. Современные аспекты применения искусственного интеллекта для прогнозирования стихийных бедствий на реках Российской Федерации (на примере реки Амур) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 97–107. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-97-107>

Modern aspects of the use of artificial intelligence for predicting natural disasters on the rivers of the Russian Federation (using the example of the Amur River)

Nikita E. Aleksandrov^a , Dmitry N. Ermakov^{a,b} ,
Alla E. Brom^c , Irina N. Omelchenko^c , Sergey V. Shkodinsky^{a,d} 

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

^bPolyus Scientific Research Institute, Moscow, Russian Federation

^cBauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

^dMoscow State Regional University, Mytishchi, Russian Federation

✉ 1042210208@rudn.university

Article history

Received: March 10, 2022

Revised: May 28, 2022

Accepted: June 4, 2022

Keywords:

disaster management, floods forecasting, Amur River, machine learning, linear regression, neural network, gradient boosting

Abstract. Among all observed natural disasters, water-related disasters are the most frequent and pose a serious threat to people and socio-economic development. River floods are the most relevant for the Russian Federation, and the importance of flood control, particularly in the Far East, was repeatedly stressed by Russian President Vladimir Putin. The quality of performance of various artificial intelligence methods on the task of predicting river floods in the Amur River basin was investigated. The uniqueness of the research lies in the fact that similar studies have not previously been conducted for this river. The main task of the work was the subsequent practical application of the obtained results in flood forecasting and risk management systems. For this purpose, the best method was searched among widely used methods on the market, which have a rich choice of auxiliary solutions: gradient tree binning, linear regression without regularisation and neural networks. The study design focus on achieving maximum reproducibility of the results. The gradient boosting over the trees in the domestic implementation of CatBoost showed the highest quality. The results of this work can be extrapolated to other rivers comparable in both area and volume of data collected.

For citation

Aleksandrov NE, Ermakov DN, Brom AE, Omelchenko IN, Shkodinsky SV. Modern aspects of the use of artificial intelligence for predicting natural disasters on the rivers of the Russian Federation (using the example of the Amur River). *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):97–107. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-97-107>

Введение

Постановка проблемы. Среди всех наблюдаемых природных стихийных бедствий, катастрофы, связанные с водой, наиболее частые и представляют серьезную опасность для людей и социально-экономического развития. Согласно [1], в период с 1900 по 2006 г. всевозможные виды наводнений были ответственны за 30 % от общего числа стихийных бедствий, 19 % от общего числа погибших и 48 % от общего числа пострадавших. В этом же отчете утверждается, что природные катастрофы, связанные с водой, ответственны за 72 % от общего экономического ущерба, причиненного стихийными бедствиями, из которых 26 % – это наводнения. Во время селекторных совещаний с членами правительства президент РФ В.В. Путин неоднократно подчеркивал важность борьбы с паводками на Дальнем Востоке: «В зону возможного

подтопления могут попасть до пяти тысяч населенных пунктов, это порядка 1,5 млн человек. Какие бы сюрпризы нам природа ни преподносила, мы, безусловно, должны быть готовы к любому варианту развития событий»¹. В связи с изменением климата ожидается увеличение числа потерь от таких явлений. Таким образом, важно улучшать качество принятия решений при реагировании на наводнения.

Разработка систем прогнозирования и управления риском наводнений рекомендуется в качестве одной из мер подготовки к ним [2] по нескольким причинам. Во-первых, из-за неопределенности, связанной с силой, временем и местом наводнений,

¹ Замахина Т. Президент заявил о непростой обстановке с паводками и пожарами // Российская газета. 2021, 31 марта. URL: <https://rg.ru/2021/03/31/putin-zaiavil-o-neprosto-obstanovke-s-pavodkami-i-pozharami.html?ysclid=l6j9qiq7yf690189806> (дата обращения: 12.05.2022).

зачастую невозможно полностью контролировать их, и, как следствие, абсолютная защита от этого явления не всегда возможна [3]. Во-вторых, традиционные методы управления риском наводнений в основном состоят из структурных мер защиты, таких как дамбы и плотины, изменяющих характеристики наводнения для уменьшения пикового уровня воды и снижения масштаба разлива. Несмотря на то что структурные меры снижают риск наводнения, они не могут полностью устранить его. К тому же на практике данные меры защиты невозможно внедрить в некоторых областях: например, в отдаленные поселения Сибири и на Дальнем Востоке. Также они могут приводить к нежелательным экологическим последствиям [4]. Следовательно, возведение структурных мер защиты не всегда целесообразно, в таких случаях предиктивные модели могут служить более простой в имплементации и дешевой альтернативой [5]. Можно заключить, что разработка и улучшение методов прогнозирования наводнений важны для решения задач управления и принятия решений при реагировании на паводки.

Данная работа фокусируется на поиске наилучшего метода машинного обучения для моделирования паводков на р. Амур, где они наносят значительный ущерб населению и экономике региона [6]. Исследование предпринято с целью улучшения методов прогнозирования паводков для последующего использования результатов исследования в решении задач управления при реагировании на паводки.

Существующие методы. Зачастую модели, прогнозирующие паводки, предсказывают будущий уровень воды или скорость потока. Классические методы, используемые в гидрологии, основаны на определении зависимостей между метеорологическими данными, характеристиками бассейна, субстрата и смоделированными целевыми значениями [7]. Существует множество подходов к моделированию природных процессов, имплементированных в виде гидрологических моделей. Такие модели могут быть основаны как на детерминистических, так и на стохастических подходах. Большинство моделей не учитывают специфику региона, а основаны на некоторых общих, характерных для любой реки принципах.

Для адаптации моделей к специфике региона прибегают к их калибровке [8]. Это позволяет снизить ошибку предсказания. Но калибровка сложных моделей может быть вычислительно слишком сложной. К тому же сложные модели требуют большого количества данных, которых может быть недостаточно или не быть совсем. Калибровка влечет и ряд

прочих трудностей, делая применение таких моделей неэффективным в некоторых случаях [9].

Другой способ моделирования паводков – описание паттернов потоков воды с помощью дифференциальных уравнений. Недостаток таких методов заключается в нестабильности решений, вызванных накоплением ошибки и высокой вычислительной сложностью. К тому же такие модели могут быть трудно переносимы на другие реки, для которых им могут потребоваться дополнительные параметры.

В моделировании паводков хорошо себя показывают методы машинного обучения, которым удается достигать высокой точности в этой задаче [10]. У них есть несколько важных практических плюсов: во-первых, очень развитая сопутствующая техническая экосистема [11], что существенно упрощает разработку систем на основе таких методов; во-вторых, наличие в России множества специалистов по машинному обучению², что дает возможность найти людей для создания промышленного решения на основе таких методов. В последние годы были созданы методы, позволяющие интерпретировать предсказания любых моделей машинного обучения. Например, метод SHAP [12], использующий подход из кооперативной теории игр и позволяющий проинтерпретировать отдельное предсказание. Из минусов этого подхода можно выделить необходимость большого количества данных для наиболее передовых моделей машинного обучения. На основе описанных доминирующих положительных факторов было решено сфокусироваться в данной работе именно на методах машинного обучения.

Научная новизна исследования заключается не только в определении наилучшего метода машинного обучения для предсказания паводков на р. Амур, но еще и в изучении работы метода CatBoost [13], созданного российской компанией «Яндекс», что актуально в условиях санкций и импортозамещения технологий.

Описание данных. Данные для моделирования и тестирования были предоставлены Сбербанком совместно с МЧС, Минприроды и Росгидрометом в рамках хакатона по разработке решений для предсказания паводков³.

² Академия больших данных MADE и hh.ru составили портрет российского специалиста в сфере Data Science. 2020. URL: <https://vk.com/company/ru/press/releases/10682/> (дата обращения: 04.03.2022).

³ NoFloodWithAI: прогнозирование паводков на реке Амур. URL: https://github.com/sberbank-ai/no_flood_with_ai_aij2020 (дата обращения: 04.03.2022).

Река Амур является трансграничной, основная часть бассейна находится в пределах Российской Федерации. Для Амура характерна низкая водность в зимний период, небольшие половодья весной и неоднократные резкие подъемы воды во второй половине лета и в начале осени. Маловодные периоды сменяются годами большой воды [14]. В многолетнем режиме водного стока Амура отчетливо выражено чередование периодов пониженной и повышенной водности, каждый продолжительностью 10–15 лет [15]. Амур, по оценке гидрологов и исходя из истории наблюдений, вошел в очередной период высокой водности в конце 2000-х гг. Основываясь на гидрологической

закономерности режима Амура, в ближайшие 5–7 лет следует ожидать сложную паводковую обстановку в течении Среднего и Нижнего Амура (наиболее сложная обстановка от слияния р. Сунгари и до Комсомольского района включительно). Наиболее крупномасштабные наводнения произошли в 2013 и 2019 гг., их причиной стали тропические циклоны, которые несли теплый влажный воздух, вызывали фронтальные разделы и сильные атмосферные осадки. В 2013 г. на значительной площади за 2–3 месяца сумма выпавших осадков превысила годовую, а местами и полугодовую норму. На рис. 1 представлена карта бассейна р. Амур.

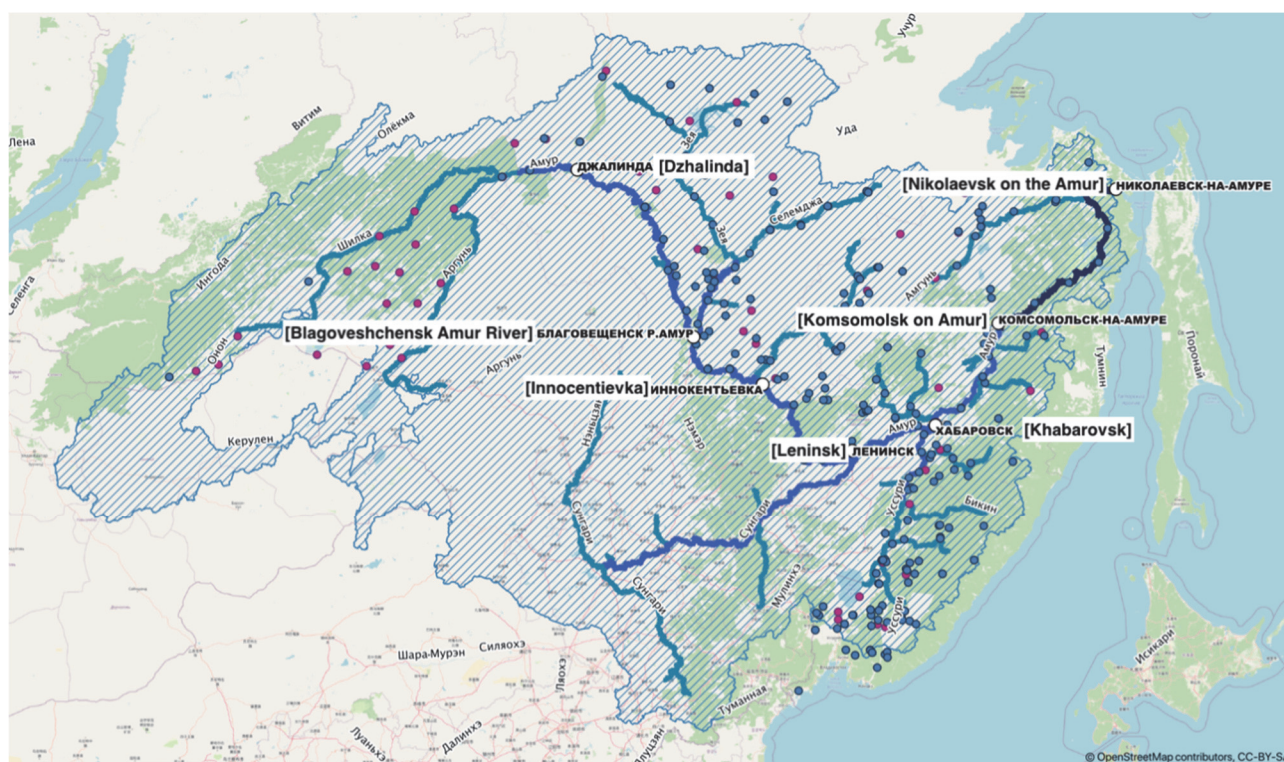


Рис. 1. Бассейн р. Амур и его основные притоки
Figure 1. The Amur River basin and its main tributaries

В наборе данных представлены наблюдения на 198 гидрологических постах сети Росгидромета за период с 1984 по 2018 г., содержащие данные об уровнях воды, расходах, температуре воды, наблюдения за поверхностью воды (становление ледостава, вскрытие). Сведения об уровнях воды описаны тремя величинами: минимальный, максимальный и средний уровни воды за день. На рис. 2 представлено несколько примеров данных по гидрологическому посту под идентификатором 5001. Отсутствие значений на графике означает пропуск.

Как видно из графиков, временной ряд уровня воды обладает сезонностью с периодом в один год, что полностью согласуется с контекстом задачи. Также видно, что в приведенном временном ряду имеются пропуски: например, их много с 1985 по 1990 г. на рис. 3. В 33 % наблюдений пропущены значения температуры воды, в 41 % – нет данных по потреблению воды, менее чем в 1 % – отсутствуют данные по уровню воды.

Задача – определить модель машинного обучения для предсказания уровня воды на 10 дней вперед.

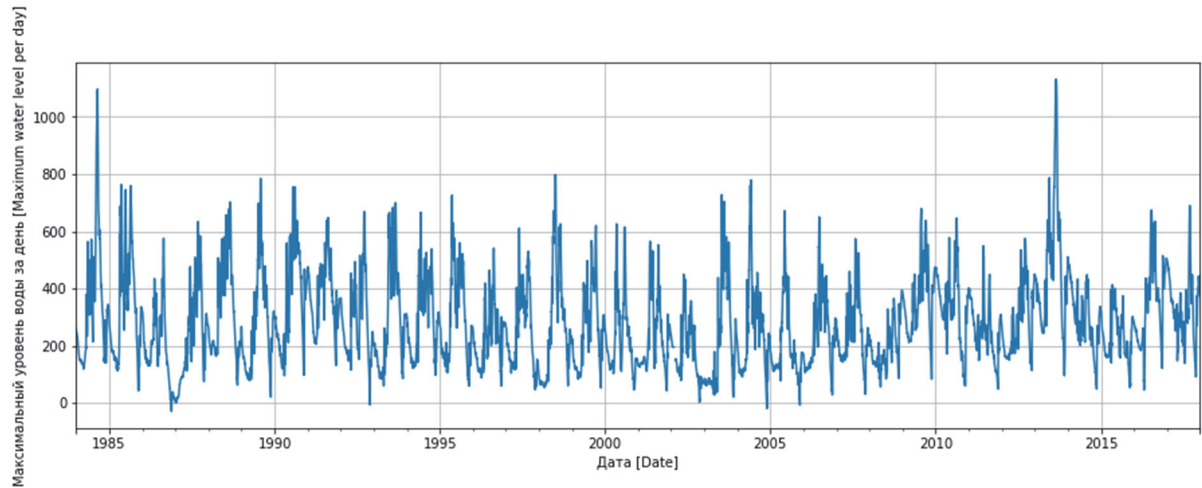


Рис. 2. Дневные значения максимального уровня воды для датчика 5001
Figure 2. Daily values of the maximum water level for the sensor 5001

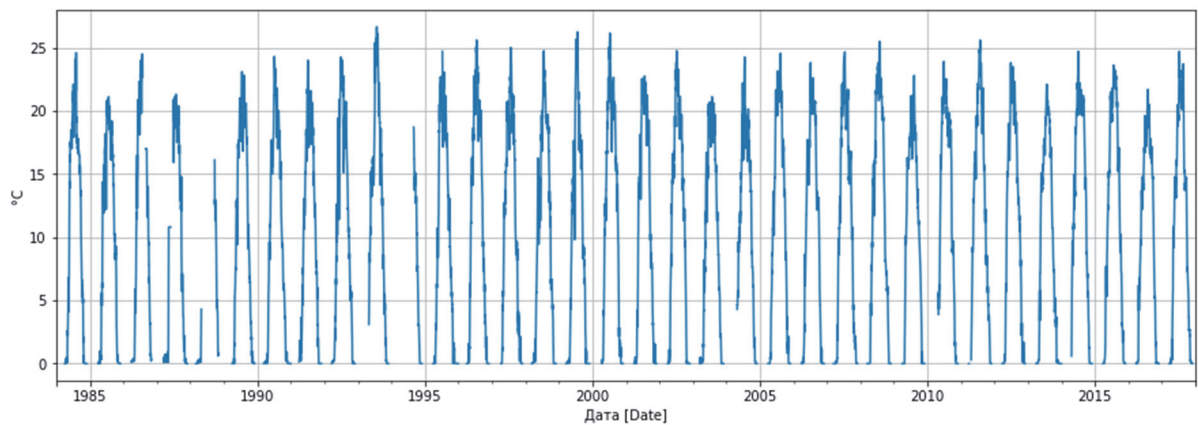


Рис. 3. Дневные значения средневенной температуры
Figure 3. Daily mean temperatures

1. Методы решения задачи

Исследовано применение трех алгоритмов машинного обучения для предсказания паводков на р. Амур: линейная регрессия, нейронные сети и градиентный бустинг в реализации CatBoost. Данные алгоритмы выбраны по следующим практическим соображениям: во-первых, они обладают крайне развитой экосистемой вспомогательных решений; во-вторых, подавляющее большинство специалистов по машинному обучению умеет с ними работать. Это позволит использовать полученные результаты для быстрого построения промышленной системы.

Линейная регрессия – это одна из наиболее изученных и распространенных статистических моделей, описывающая зависимость целевой пере-

менной y от другой или нескольких других целевых переменных x через линейную зависимость.

Регрессионная модель описывается следующим уравнением:

$$y = f(x, b) + \varepsilon, E[\varepsilon],$$

где b – параметры модели; ε – случайная ошибка модели, а $f(x, b)$ имеет вид

$$f(x, b) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k,$$

где b_j – параметры регрессии; x_j – регрессоры; k – количество факторов модели [16].

Параметры подбираются через минимизацию квадратичной ошибки на обучающей выборке:

$$\min_b \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i, b)),$$

где i – номер объекта из обучающей выборке; N – размер обучающей выборке.

В данной работе использована реализация линейной регрессии из библиотеки для языка программирования Python `scikit-learn`⁴.

Нейронная сеть – математическая модель и ее программная реализация, созданная на основе принципов организации и функционирования биологических нейронных сетей⁵. «Нейрон» в сети получает сигнал в виде вектора действительных чисел, обрабатывает его и отдает одно действительное число, называемое сигналом. Сигнал является результатом вычислений нелинейной функции над взвешенной суммой входных значений. Благодаря этому нейронные сети в отличие от линейной регрессии способны распознавать нелинейные закономерности в данных. Нейроны между слоями связаны друг с другом, и каждая связь в каждом нейроне имеет вес. Вес в нейронах изменяется во время обучения нейронной сети и отвечает за усиление или ослабление сигнала в соединении.

Нейронные сети обучаются с помощью алгоритма обратного распространения ошибки [17]. Его суть в расчете градиента функции потерь относительно веса нейронной сети для одного обучающего экземпляра, а затем изменения веса значений веса в направлении антиградиента функции потерь. Эффективность данного метода позволяет использовать его для обучения многослойных нейронных сетей.

Будем проверять нейронную сеть с одним полно связным слоем размером 100, функцией активации ReLU [18] и оптимизатором Adam. Реализация этой модели будет взята из Python `scikit-learn`⁶.

Градиентный бустинг (CatBoost). В работе использована разновидность градиентного бустинга, называемая градиентный бустинг над деревьями.

Градиентный бустинг над деревьями представляет собой ансамбль деревьев решений. В основе его алгоритма лежит итеративное обучение деревьев решений с целью минимизации функции потерь. Благодаря особенностям деревьев решений градиентный бустинг способен работать с категориальными признаками и справляться с нелинейными закономерностями в данных.

В работе будет исследована реализация этого алгоритма из библиотеки `CatBoost`, одним из преимуществ которой является умение работать с пропусками в данных.

2. Эксперименты

Подготовка данных и их разбиение. Для выявления оптимальной модели использовались только исторические данные об уровнях воды и толщине льда без сложных объясняющих признаков, поскольку они избыточны для задачи определения наилучшего алгоритма машинного обучения, а построение наиболее точной модели не являлось целью исследования. Объясняющие признаки описывают сезонность временных рядов и распределение изменений их значений за различные промежутки времени.

Как и в любых реальных данных до расчета фич и обучения моделей была выполнена очистка данных. В датасете обнаружены явные ошибки и выбросы, выглядящие, например, как на рис. 4.

Сначала были удалены явные ошибки в данных. Это наблюдения, в которых минимальный уровень воды за день превышал максимальный, средний уровень превышал максимальный, средний уровень был меньше минимального, потому что с точки зрения математики такое невозможно. В таких наблюдениях показателям, отвечающим за описание уровня воды, были присвоены значения NaN. Всего таких наблюдений – 0,04 %.

Значения меньше 0 не будут удаляться, потому что они являются результатом неправильного выбора нуля графика гидрологического поста. Обычно на практике за нуль графика принимается значение на 0,5 м ниже наблюдавшегося уровня воды, и, возможно, из-за обмеления реки нуль мог уменьшиться. Следовательно, несмотря на наличие отрицательных значений динамика изменения уровня воды должна оставаться корректной. Наглядно это можно увидеть на рис. 2, где периодически наблюдаются значения меньше 0, но визуально динамика уровня воды выглядит корректно. Всего таких наблюдений около 5 %.

⁴ `Sklearn.linear_model`. Linear regression. URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LinearRegression.html (дата обращения: 02.02.2022).

⁵ Нейронная сеть // Большая российская энциклопедия: в 35 т. Т. 35. / гл. ред. Ю.С. Осипов. М.: Большая российская энциклопедия, 2017.

⁶ `Scikit-learn`. 1.17. Neural network models (supervised). URL: https://scikit-learn.org/stable/modules/neural_networks_supervised.html (дата обращения: 02.02.2022).

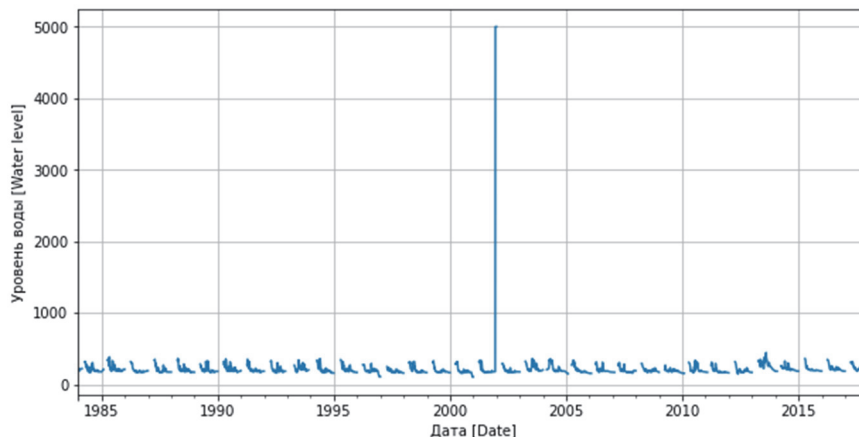


Рис. 4. Ежедневные значения минимального уровня воды для датчика 6535
Figure 4. Daily minimum water levels for 6535 sensor

При возможности выполнялось восполнение пропусков в показателях максимального уровня воды следующим образом: в наблюдениях с пропусками по максимальному уровню воды, но с заполненными значениями по среднему и минимальному уровням и при их равенстве, максимальному уровню присваивалось то же значение. Потому что минимум может быть равен среднему только при условии, что среднее считалось по одинаковым значениям. Всего таких наблюдений около 0,83 %.

Далее была посчитана целевая переменная, равная максимальному уровню воды через 10 дней. Построена одна модель для всех датчиков по следующим причинам: во-первых, так модель получает больше данных для обучения; во-вторых, данные по многим датчикам выполняют некоторую регуляризацию модели, так как ей придется выучивать паттерны, которые работают в большинстве мест реки.

Все наблюдения, для которых отсутствовала целевая переменная удалены. Далее посчитаны дополнительные объясняющие признаки:

1) изменение максимального уровня, температуры и потребления воды за 1, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 60, 180, 365 дней, чтобы учесть влияние сезонности и индивидуальные магнитуды изменений;

2) среднее однодневных изменений уровня воды за 7, 30, 90, 365 дней;

3) среднее однодневных изменений температуры за 7, 30, 90 дней;

4) среднее однодневных изменений потребления воды за 7 дней;

5) стандартное отклонение однодневных изменений уровня воды за 7, 30, 90, 365 дней;

6) стандартное отклонение однодневных изменений температуры за 7, 30, 90 дней;

7) стандартное отклонение однодневных изменений потребления воды за 7 и 30 дней.

Все дополнительные объясняющие признаки выше и температура воды вошли в финальный список фич, на которых обучаются модели и делается предсказание.

В конце данные были разбиты на обучающую и тестовую выборки. В обучающую вошли первые 80 % дат, все остальные даты вошли в тестовую. Разбиение было сделано по датам, чтобы добиться максимальной корректности эксперимента за счет того, что в обучающей выборке не окажется дат из тестовой.

Метрики. Для оценки качества модели использованы следующие метрики:

1. Коэффициент эффективности модели Нэша – Сатклифа (NSE) [19]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_t^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_t^t - \bar{Q}_0)^2}.$$

Это классическая метрика для оценки предиктивной силы гидрологической модели. Она принимает значение 1, если были получены идеальные предсказания, 0 – если предсказания были так же хороши, как средние и отрицательные значения для предсказаний, работающих хуже, чем среднее.

2. Коэффициент детерминации

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (D_0^t - D_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (D_0^t - \bar{D}_0)^2}.$$

Эта метрика аналогична коэффициенту эффективности модели Нэша – Сатклифа, но вместо

абсолютных значений уровней использует относительные изменения уровня воды.

3. *Симметричная средняя абсолютная ошибка в процентах (SMAPE)*:

$$\text{SMAPE} = \frac{100\%}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|Q_m^t - Q_o^t|}{(|Q_m^t| + |Q_o^t|) / 2}$$

4. *Средняя абсолютная ошибка (MAE)*:

$$\text{MAE} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |D_o^t - D_m^t|,$$

где T – количество наблюдений в выборке; t – индекс наблюдения; Q_o^t – наблюдаемое значение уровня воды в наблюдение t ; Q_m^t – предсказанное значение уровня воды в наблюдение t ; $\overline{Q_o}$ – среднее наблюдаемое значение; D_o^t – целевое изменение уровня воды для объекта t ; D_m^t – предсказанное изменение уровня воды в момент t ; $\overline{D_o}$ – среднее целевое изменение уровня воды.

Поскольку модели будут предсказывать изменение уровня воды, то Q_m^t будет получаться из суммы текущего значения уровня воды и предсказанного.

Метрика NSE выбрана потому, что является классической в задаче моделирования будущего уровня вод, R^2 – одна из наиболее распространенных метрик для задачи регрессии, а SMAPE и MAE выбраны как вспомогательные метрики, так как могут с некоторой вероятностью определить аномальное поведение модели.

Моделирование. Поскольку линейная регрессия и нейронная сеть не умеют обрабатывать

пропуски в данных, то для экспериментов их необходимо предварительно обработать.

Обработка пропусков сделана в два этапа:

1) в первую очередь там, где возможно, пропуски были заполнены последним известным значением;

2) все оставшиеся пропуски заполнены нулем. Идея заполнения нулем следующая: поскольку и в линейной регрессии, и в узлах нейронной сети происходит линейная комбинация, то зануление фичи уберет ее из линейной комбинации.

Для градиентного бустинга не было необходимости выполнять заполнение пропусков, потому что его реализация в библиотеки CatBoost умеет их обрабатывать. Это свойство является одним из преимуществ данного алгоритма, так как, во-первых, снижает затраты человеческого времени и вычислительных ресурсов на предварительную обработку данных, а во-вторых, поскольку пропуски обрабатываются отдельно, то наличие пропуска в определенном месте само по себе может являться информацией, способной повысить качество предсказания. В экспериментах использовались настройки бустинга, при которых пропущенные значения обрабатывались как самые маленькие во всей выборке. Это метод обработки пропущенных значений по умолчанию.

После обработки пропусков каждая модель была обучена на одном и том же наборе обучающих данных и затем протестирована на одной и той же тестовой выборке. В результате получены результаты, представленные в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Качество работы моделей на обучающей выборке

Название модели	NSE	R^2	SMAPE	MAE
Линейная регрессия	0,917	0,131	19,92	30,54
Нейронная сеть	0,917	0,278	18,74	28,08
Градиентный бустинг	0,937	0,359	16,57	26,21

Table 1

Model performance on train set

Model name	NSE	R^2	SMAPE	MAE
Linear regression	0.917	0.131	19.92	30.54
Neural network	0.917	0.278	18.74	28.08
Gradient boosting	0.937	0.359	16.57	26.21

Таблица 2

Качество работы моделей на тестовой выборке

Название модели	NSE	R^2	SMAPE	MAE
Линейная регрессия	0,916	0,084	19,37	32,29
Нейронная сеть	0,913	0,175	18,13	29,95
Градиентный бустинг	0,929	0,224	16,28	28,19

Table 2

Model performance on test set

Model name	NSE	R^2	SMAPE	MAE
Linear regression	0.916	0.084	19.37	32.29
Neural network	0.913	0.175	18.13	29.95
Gradient boosting	0.929	0.224	16.28	28.19

По результатам моделей на тестовой выборке можно безоговорочно утверждать, что наилучшей моделью машинного обучения для предсказания паводков на р. Амур является градиентный бустинг в реализации CatBoost. Его значения NSE на 1 % превысили аналогичные показатели нейронной сети и линейной регрессии, а по показателям R^2 прирост качества составил в 1,28 и 2,6 раз соответственно. Второе место с большим отрывом от третьего получает нейронная сеть. Отчасти превосходство градиентного бустинга в данной задаче можно объяснить обилием данных и наивысшей сложностью модели среди представленных – при таком количестве данных она способна найти в них больше паттернов, чем остальные. Но необходимо заметить, что линейная регрессия переобучилась меньше остальных моделей, поэтому она, скорее всего, могла бы стать лучшей на меньшем количестве наблюдений.

Заключение

Стояла задача определить наилучшую модель машинного обучения для предсказания паводков на р. Амур. Выбор происходил среди трех наиболее распространенных в индустрии моделей: линейная регрессия, нейронная сеть и градиентный бустинг. Использовались наблюдения Росгидромета с 1984 по 2018 г. Проведена тщательная подготовка данных. В результате экспериментов наилучшие результаты продемонстрировал градиентный бустинг. В дальнейшем полученные результаты можно использовать для построения модели наибольшей точности для р. Амур, а именно создать разно-

образные и сложные объясняющие признаки и подобрать оптимальные параметры для применения градиентного бустинга к этой задаче. Предположительно результаты исследования переносимы на другие реки, по которым количество наблюдений сравнимо с Амуром.

Список литературы / References

1. Yoganath A, Junichi Y. *Global trends in water related disasters: an insight for policymakers*. Tsukuba: International Centre for Water Hazard and Risk Management (UNESCO); 2009.
2. Arduino G, Reggiani P, Todini E. Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. *Hydrology and Earth Sciences*. 2005;9(4):280–284.
3. Moore R, Bell V, Jones D. Forecasting for flood warning. *Comptes Rendus Geosciences*. 2005;337(1–2): 203–217.
4. Tullos D. Assessing environmental impact assessments: a review and analysis of documenting environmental impacts of large dams. *Journal of Environmental Management*. 2008;90:208–223.
5. DiFrancesco K, Tullos D. Flexibility in water resources management: review of concepts and development of assessment measures for flood management systems. *Journal of the American Water Resources Association*. 2014;50(6):1527–1539.
6. Makhinov AN, Kim VI, Voronov BA. Flooding in the Amur basin in 2013: causes and consequences. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2014;(2(174)):5–14. (In Russ.)
Махинов А.Н., Ким В.И., Воронов Б.А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник ДВО РАН. 2014. № 2 (174). С. 5–14.

7. Ramírez J. Prediction and modeling of flood hydrology and hydraulics. In: Wohl EE. (ed.) *Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities*. Cambridge: Cambridge University Press; 2010. p. 498.
8. Sahraei S, Asadzadeh M, Unduche F. Signature-based multi-modelling and multi-objective calibration of hydrologic models: application in flood forecasting for Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*. 2020;588:125095. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125095>
9. Aqil M, Kita I, Yano A. Analysis and prediction of flow from local source in a river basin using a Neuro-fuzzy modeling tool. *Journal of Environmental Management*. 2007;85(1):215–223.
10. Chang FJ, Hsu K, Chang LC, Yu Y. *Flood forecasting using machine learning methods*. MDPI AG; 2019.
11. Dipanjan S, Raghav B, Tushar S. The Python machine learning ecosystem. In: *Practical Machine Learning with Python: A Problem-Solver's Guide to Building Real-World Intelligent Systems*. New York: Apress; 2002. p. 67–118.
12. Carvalho D, Pereira E, Cardoso J. Machine learning interpretability: a survey on methods and metrics. *Electronics*. 2019;8(8):832. <https://doi.org/10.3390/electronics8080832>
13. Prokhorenkova L, Gusev G, Vorobev A, Dorogush AV, Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features. *32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018)*. Montréal; 2018. p. 6638–6648. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.09516>
14. Novorotsky PV. The Amur's flow rate fluctuations for the last 110 years. *Geography and Natural Resources*. 2007;(4):86–90. (In Russ.)
Новороцкий П.В. Колебания стока Амура за последние 110 лет // География и природные ресурсы. 2007. № 4. С. 86–90.
15. Makhinov AN. Amur terrigene and chemical discharge formation. *Proceedings of the International Kyoto Symposium*. Kyoto; 2005. p. 61–65.
16. Demidenko E. *Linear and non linear regression. Finance and statistics*. Moscow; 1981. p. 302. (In Russ.)
Демиденко Е. Линейная и нелинейная регрессия. Финансы и статистика. М., 1981. С. 302.
17. Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*. 1986;323:533–536.
18. Hinton GE, Nair V. Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines. *Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning*. Haifa; 2010. p. 807–814.
19. Nash J, Sutcliffe JV. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 1970;10(3):282–290.

Сведения об авторах

Александров Никита Эдуардович, аспирант, департамент инновационного менеджмента в отраслях промышленности, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-8183-0257; 1042210208@rudn.ru

Ермаков Дмитрий Николаевич, доктор политических наук, доктор экономических наук, кандидат исторических наук, доцент департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-0811-0058, eLIBRARY SPIN-код: 6835-3155; ermakov-dn@rudn.ru

Бром Алла Ефимовна, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной логистики, факультет инженерного бизнеса и менеджмента, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; ORCID: 0000-0003-3633-1197, eLIBRARY SPIN-код: 3110-1259; allabrom@bmstu.ru

Омельченко Ирина Николаевна, доктор технических наук, доктор экономических наук, декан факультета инженерного бизнеса и менеджмента, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; ORCID: 0000-0003-4707-1079, eLIBRARY SPIN-код: 7548-0546; logistic@ibm.bmsru.ru

Шкодинский Сергей Всеволодович, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой экономического и финансового образования, Московский государственный областной университет, Российская Федерация, 141014, Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24; профессор департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-5853-3585, eLIBRARY SPIN-код: 5372-2519; sh-serg@bk.ru

About the authors

Nikita E. Aleksandrov, Ph.D student, Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8183-0257; 1042210208@rudn.ru

Dmitry N. Ermakov, Dr. of Political Sciences, Dr. of Economics, Ph.D of Historical Sciences, Professor, Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0811-0058, eLIBRARY SPIN-code: 6835-3155; ermakov-dn@rudn.ru

Alla E. Brom, Dr. of Economics, Professor of the Department of Industrial Logistics, Faculty of Engineering Business and Management, Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3633-1197, eLIBRARY SPIN-code: 3110-1259; allabrom@bmstu.ru

Irina N. Omelchenko, Dr. of Technical Sciences, Dr. of Economics, Dean of the Faculty of Engineering Business and Management, Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4707-1079, eLIBRARY SPIN-code: 7548-0546; logistic@ibm.bmsru.ru

Sergey V. Shkodinsky, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economic and Financial Education, Moscow State Regional University, 24 Very Voloshinoy St, Mytishi, 141014, Russian Federation; Professor of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5853-3585, eLIBRARY SPIN-code: 5372-2519; sh-serg@bk.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-108-116
UDC 510.52:519.16

Research article / Научная статья

Necessary and sufficient conditions for dividing the structure of algorithms into non-intersecting sets: polynomial and enumeration algorithms

Natalia L. Malinina

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation
✉ malinina806@gmail.com

Article history

Received: January 28, 2022
Revised: March 11, 2022
Accepted: April 15, 2022

Keywords:

algorithm, alphabet, graph, graph-scheme, block-graph, cyclomatic number, isomorphism

Abstract. The article is devoted to a rigorous proof of the first millennium problem, which is named as $P \neq NP$. This problem was raised in 1971 by S. Cook and marked the beginning of a long struggle in order to understand and prove it. The problem is closely related to the concept of a combinatorial explosion, which concept was aroused in the early 1970s and became a symbol of the enormous difficulties that developers of algorithms and programs have to face, since the complexity of the tasks that have to be solved is growing every day. The presented proof is based on the achievements of graph theory and algorithm theory. Necessary conditions (normalizing), to which arbitrary algorithm must satisfy in order to be solved with a help of a Turing machine, are proved in the article. Further, using the theory of algorithms and graph theory, it is proved that normalized (necessary condition) graphs (visualization of algorithms) with respect to such a characteristic of their complexity as a cyclomatic number fall into three non-intersecting sets that have different properties. These properties are determined by the structural features of graphs, and they can be taken into account when developing algorithms and programs for solving mass problems. The division of algorithms of mass problems into three non-intersecting sets is proved. Such division corresponds with graph-schemes, or block-schemes of polynomial (P) or enumeration (NP) algorithms. This proves a sufficient condition, to which algorithms must satisfy in order to belong to different classes and actually confirm that $P \neq NP$.

For citation

Malinina NL. Necessary and sufficient conditions for dividing the structure of algorithms into non-intersecting sets: polynomial and enumeration algorithms. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):108–116. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-108-116>

Необходимые и достаточные условия разделения структур алгоритмов на непересекающиеся множества: полиномиальные и переборные алгоритмы

Н.Л. Малинина

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация
✉ malinina806@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 28 января 2022 г.
Доработана: 11 марта 2022 г.
Принята к публикации: 15 апреля 2022 г.

Аннотация. Представлено строгое доказательство первой проблемы тысячелетия, а именно: $P \neq NP$, которая была озвучена в 1971 г. в статье Стивена Кука и положила начало долгой борьбе за ее осмысление и доказательство. Проблема тесно связана с понятием комбинаторного взрыва,



Ключевые слова:

алгоритм, алфавит, граф, граф-схема, блок-схема, цикломатическое число, изоморфизм

возникшего в начале 1970-х гг. Она стала символом тех громадных трудностей, с которыми приходится сталкиваться разработчикам алгоритмов и программ, поскольку сложность решаемых задач с каждым днем растет. Предлагаемое доказательство основано на достижениях теории графов и теории алгоритмов. Обосновывается необходимое условие того, чтобы произвольный алгоритм мог быть решен с помощью машины Тьюринга и приводятся необходимые теоремы. Далее с помощью теории алгоритмов и теории графов доказывается, что нормализованные графы (визуализации алгоритмов) относительно такой характеристики их сложности, как цикломатическое число, распадаются на три непересекающихся множества, которые обладают различными свойствами. Эти свойства определяются структурными особенностями графов, их можно учесть при разработке алгоритмов и программ для решения массовых задач. Доказывается разделение алгоритмов массовых задач на непересекающиеся множества, которые соответствуют граф-схемам (блок-схемам) полиномиальных (P) или переборных (NP) алгоритмов. Этим обосновывается достаточное условие, которое, собственно, и подтверждает, что $P \neq NP$.

Для цитирования

Малинина Н.Л. Необходимые и достаточные условия разделения структур алгоритмов на непересекающиеся множества: полиномиальные и переборные алгоритмы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 108–116. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-108-116>

Introduction

The P vs NP problem, or the Cook problem [1; 2], as it is called, ranks first on the list of millennial problems. This article continues a twelve-year-old project presented by the author at the International Mathematical Congress in Hyderabad [3]. The relationship between the classes P and NP is considered in the theory of computational complexity (a branch of the theory of computation), which studies the resources needed to solve a certain problem. Since 1971, many topologists, algorithm designers, and other scientists have devoted their time and effort in order to solve it. The most cited author who writes on the topic is A. Razborov [4]. There is also a website dedicated to this problem.¹ It contains links to 116 articles on possible solutions of the problem.

Let us dwell only on those articles that were published in refereed journals. One of them is an article by M. Giannakakis [5]. The article does not solve the problem itself, but only verifies that some particular approach to the proof does not work. There are a few more references to papers proving that $P = NP$. They are mainly devoted to the successful attempts to create polynomial algorithms for some special cases, and thus authors pretended that $P = NP$. However, we should not forget that the number of mass problems that we cannot accurately solve with-

out the use of enumeration algorithms is expanding every day.

A little less works have been written to prove that $P \neq NP$. It is almost impossible to carefully review all the works (there are more than 50 of them). A part of the works is based on the fact that there are models (specific special cases) for which polynomial algorithms cannot be found and, accordingly, it was concluded that $P \neq NP$. In particular, this is the work of R. Valeyev [6]. An interesting article was presented by A. Anilla [7], in which he comes to the proof of $P \neq NP$ by investigating computational complexity applying the principle of increasing entropy. In the work of V. Ivanov [8], the proof is based on more accurate estimates of the lower bounds on the time complexity, which are valid for all algorithms for solving. The most recent work, which is also devoted to the proof of $P \neq NP$ problem [9] is posted on the Internet, and the opinion of the mathematical community is also not yet known. A number of proofs, in particular, the works of Anand, Deliokar, Vian, Barbos² and some others, have got responses and were criticized.

It should be noted that only the proof of the fact that $P \neq NP$ will give us nothing for solving problems from the practical area. It is necessary to divide the tasks according to some structural features. This will allow

¹ The P -versus- NP page. Available from: <https://www.win.tue.nl/~gwoegi/P-versus-NP.htm> (accessed: 26.09.2016).

² The P -versus- NP page. Available from: <https://www.win.tue.nl/~gwoegi/P-versus-NP.htm> (accessed: 26.09.2016).

at the first stage to understand how difficult the algorithm for solving a practical problem will be.

What is the most important thing we know and don't know about the *PvsNP* problem [2]?

1. We know that for the mass problems belonging to the *P* class, we can create linear or polynomial algorithms, and obtain exact solutions or solutions that are of good approximation.

2. We know that for the mass problems from the *NP* class, we can get exact solutions if we will use enumeration algorithms or we can get acceptable solutions if we will use nonlinear or exponential algorithms.

3. We do not know whether these areas are divided into disjoint sets and how to determine the belonging of the task (or the algorithm that solves it) to the concrete area?

It seems that it is possible to approach the solution of the *PvsNP* problem from the other side, from the standpoint of the need to solve practical problems. This will allow applying the achievements of the graph theory and the theory of algorithms.

1. The problem of computation

So, in order to search for the solution of the *PvsNP* problem, we should be interested in the possibility of computing, that is, in the possibility to create algorithms and programs that solve some problems. Wherein it is not only desirable, but it is necessary to obtain economical algorithms and programs. On the one hand, it is necessary to reduce the resources of time and memory needed for the solution of problems from the *NP* class. On the other hand, it takes a lot of energy resources to build and maintain the powerful servers that are needed to solve such problems. The brute-force algorithms also need energy. The number of mass problems from the *NP* class multiplies every year. And these are not only obligatory and vital tasks, such as management of complicated systems in different social and technic areas, but also entertaining tasks such as games and social media.

We perform calculations using computers. We know that a computer can process data or solve only those problems (programs) that correspond to the Church – Turing thesis [10; 11], that is, algorithms and, accordingly, programs must have the property of effective recursiveness.

How can we achieve this magical property? This property is prescribed by the Markov principle of normalizing: “an algorithm must be normal in order to be processed by a Turing machine” [12]. Basic-

ly, all algorithms are normalizable, this is confirmed by the practice of developing algorithms and programs [12].

It is well known that all algorithmic schemes and their compositions (up to equivalence) lead to normal algorithms. Operators in algorithms are implemented in a specific order or in the order of their numbering. In turn, the numbering of operators can be performed if the set of operators is recursive. However, none of the algorithmic systems still has any predetermined way of numbering the operators [12; 13]. It is also well known that in order to create the property of recursiveness, it is necessary to expand the alphabet of the algorithm and it is possible to be done by adding only one letter [12]. It is also known that algorithms can be visualized using directed graphs.

The next question arises: how to add this letter and add it somehow automatically? How to make an arbitrary algorithm normal or efficiently recursive? This problem was solved in 1972 in L. Malinin's doctoral dissertation, but was published only in 2009 in the book “Graph Isomorphism in Theorems and Algorithms” [14].³

2. Extension of graph theory and connection with theory of algorithms

Let's turn to graph theory. Before the publication of the [14], devoted to the solution of the graph isomorphism problem, there was no solution to the problem of a clear definition of the possible duality of graphs in graph theory.

Everyone knows that an edge graph (algorithm's graph-scheme) always has a dual vertex graph (algorithm's block-scheme). But a vertex graph does not always have its dual edge graph [15] (Figure 1).

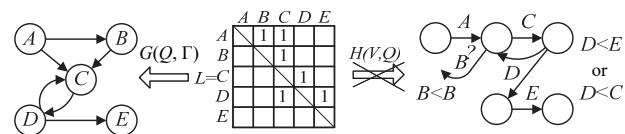


Figure 1. On the non-mandatory duality between edge and vertex graphs

The extension of graph theory in [14] allows one to solve this problem. A wide study of the dua-

³ The English variant of the book may be seen on ResearchGate. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/358570634> (accessed: 26.09.2016).

lity of graphs was carried out in this work, and the necessary and the sufficient conditions were proved for the adjacency matrix to be simultaneously the adjacency matrix of both edge and vertex graphs. It is necessary to present the main theorems, which lead to the concepts of duality of graphs and show us, how to achieve this duality.

In the basic, or main, theorem, the conditions are proved that the adjacency matrix must meet in order for the graph corresponding to it to have duality properties.

Theorem 1 “On a quasi-canonical adjacency matrix.”⁴ A theorem on the quasi-canonical adjacency matrix determines both necessary and sufficient conditions that the direct path’s L matrix has a dual nature that is at the same time it might be both E – adjacency matrix of the G graph’s vertices and R – adjacency matrix of the H graph’s edges on condition that they may have not equal cyclo-matic numbers. Theorem was proved for the case of the directed graphs.⁵

It is given: a set $Q = \{q_i\}$ and $L = QQ$ by the way of $q_i < q_j$, and $L = \|l_{ij}\|_1^n = \|e_{ij}\|_1^n$ for the $G(Q, \Gamma)$ graph. Then $\|l_{ij}\|_1^n = \|r_{ij}\|_1^n = R$ for the $H(V, Q)$ graph only if

$$L = \|l_{ij}\|_1^n \text{ generates } C_n = \|c_{ij}\|_1^n = [0].$$

A minor $|l_{ij}|_1^{n-1}$ of the every $l_{ij} = 1$ generates

$$C_{n-1} = \|c_{ij}\|_1^n = [0], \quad (1)$$

where

$$c_{ij} = l_{ij}(\Delta_{j/i} s_{ij} + \Delta_{i/j} s_{ij}),$$

$$\Delta_{j/i} s_{ij} = \left(s_{ij} - \min_j s_{ij} \right)_i,$$

$$\Delta_{i/j} s_{ij} = \left(s_{ij} - \min_i s_{ij} \right)_j,$$

$$k = n, (n - 1),$$

$$s_{ij} = l_{ij} \left(\sum_j^k l_{ij} + \sum_i^k l_{ij} \right),$$

⁴ The numbers of the theorems in the article correspond to the numbers of the theorems in the book.

⁵ The directed graph can be transformed to the undirected graph by doubling the edges of the graph.

$$\left(\min_j s_{ij} \right)_i = \min_{j/i} s_{ij} \in \{s_{ij} \neq 0\},$$

$$\left(\min_i s_{ij} \right)_j = \min_{i/j} s_{ij} \in \{s_{ij} \neq 0\}.$$

For the proof of the theorem it must be testified that the L matrix, which meets the conditions (1) and is considered as the R matrix – the adjacency matrix of H graph’s edges, has all the information for a single-valued representation of the F matrix – the adjacency matrix of H graph’s vertices. The proof is presented in [14].

Cyclo-matic numbers of graphs always satisfy the condition

$$v(G_q) \geq v(H_q). \quad (2)$$

Condition (2) reflects a certain degeneracy of the duality (quasi-duality) of the quasi-canonical adjacency matrix. In addition, this condition reflects the possibility of the presence of complex vertices in the H_q graph.

Theorem 1 defines the conditions for the existence of a quasi-canonical adjacency matrix, although in practical applications such ready-made matrices can occur only by chance. It becomes very important to find a way to transform any arbitrary matrix of direct paths, which does not satisfy the requirements of theorem 1, to the required form. The transformation of the matrix L must be such that the system of relations between the initial elements remains unchanged, that is, the transformation must be conservative with respect to the system of binary relations defined on the $Q = \{q_i\}$ set.

Transformation of the direct path matrix to a quasi-canonical form. Definitions:

1. By the *conservative transformation of the binary relation* between the two q_i and q_j elements we’ll denote such a transformation, which will allow either to insert the additional elements into the $Q = \{q_i\}$ set or to exclude them without changing the relation between the (q_i, q_j) elements. Such a transformation may be based on the transitivity property of the binary relation. For example, the initial pair is defined as $(q_i, q_j) \in Q$. Let the elements be connected by the relation: $q_i < q_j$. Let’s accept two conditions: both $q_i < q_z$ and $q_z < q_j$, and transform the initial expression. We’ll find that $q_i < q_z < q_j$. It is obvious, that two relations both $q_i < q_j$ and

$q_i < q_z < q_j$ are equivalent according to the initial pair of the elements. Therefore, the inserting of the q_z element into the $q_i < q_j$ relation is the conservative operation regarding to this relation in the initial pair.

2. Let us settle that by the Δn -transformation of the L matrix we will comprehend the addition of one row (both line and column) to the L matrix at the condition of replacement the $q_x < q_y$ relation with the pair of binary both $q_x < q_{n+1}$ and $q_{n+1} < q_y$ relations. It is evident, that the Δn -transformation is the conservative operation regarding the binary relation in the initial (q_i, q_j) pair and does not break such a structural similarity criterion as the binary relation's system.

Theorem 2 “On a quasi-normalization of the L matrix's binary relations.” Any direct path's $\|l_{ij}\|_1^n$ matrix can be transformed to the quasi-canonical (quasi-normal) $\|l_{ij}\|_1^{n+s_q}$ form, where $s_q \leq n^2 - 1$, by means of applying the Δn -transformation to such s_q elements of the $\|l_{ij}\|_1^n$ matrix, which do not satisfy to the conditions of theorem 1.

The convergence of Δn -transformation and the proof of the theorem are presented in [14]. If we correlate said above with the theory of algorithms and Markov's thesis, then the proved Δn -transformation automatically adds the missing letter to the alphabet of an arbitrary algorithm, and makes it normal or recursive. It is proved that the Δn -transformation (normalizing) of the algorithm is local, although with the help of some tweaks it can become linear. In the special case when $v(G_q) = v(H_q)$, the matrix $L_q = R_q$ is called canonical or normal. For the case of strict duality (the cyclomatic numbers are equal), the following theorem was proved.

Theorem 4 “On the canonical adjacency matrix.” Let the G initial graph be specified as the $\|e_{ij}\|_1^n$ matrix – an adjacency matrix of vertices, which corresponds to the quasi-canonical $\|r_{ij}\|_1^{n+s_q}$ matrix – an adjacency matrix of edges of the connected edge H_q graph. In order that the H_q graph's cyclomatic $v(H_q)$ number might be equal to the initial G graph's cyclomatic $v(G)$ number, it is necessary and sufficient for all the H_q graph's vertices to be simple, or, for every $r_{xy} = 1$ such condition must be fulfilled:

$$\left. \begin{array}{l} \text{If } \sum_{\substack{i=1 \\ j=y \\ n+s_q}}^{n+s_q} r_{ij} \geq 1, \text{ then } \sum_{\substack{j=1 \\ i=x \\ n+s_q}}^{n+s_q} r_{ij} = 1 \\ \text{If } \sum_{\substack{j=1 \\ i=x \\ n+s_q}}^{n+s_q} r_{ij} \geq 1, \text{ then } \sum_{\substack{i=1 \\ j=y \\ n+s_q}}^{n+s_q} r_{ij} = 1 \end{array} \right\} \quad (3)$$

As a result of graph normalizing and subsequent ordering, we get an edge graph in the form of a Koenig graph. In [14] it is proved that canonical graphs without contours, obtained as a result of normalizing, possess the recursive property, which is based on the partition of canonical adjacency matrices into mutually non-intersecting submatrices. This allows us to build recurrent local algorithms for their ordering. Such possibility gives the graphs the property of effective recursiveness (numbering is carried out in one pass along the set of rows of the matrix as it is required in [14]) to the graphs (algorithms and programs with such a structure).

The obtaining of an ordered Koenig graph is a necessary condition, but not a sufficient one. Theoretically, we get the opportunity to create a normal algorithm in the form of an ordered Koenig graph. However, the possible presence of complex vertices in the original contour graph and in the resulting graph H_q leads to some problems. The cyclomatic number of some graphs grows under the Δn -transformation, that is, it is not entirely clear what happens to graphs that have contours. So, the possibility of automating the algorithm normalizing process does not yet solve the problem of proving $PvsNP$.

We are faced with another problem – how to divide mass tasks into classes so that, according to certain signs of the task graph, it is immediately clear to which class the task belongs: P or NP . Here we face the problem of graph complexity. A characteristic of graph complexity is the cyclomatic number v . Therefore, one should turn to such a characteristic of graph complexity as a cyclomatic number and figure out whether it is a graph invariant and, if so, in what cases.

3. Cyclomatic number and isomorphism

Basically, in order to compare graphs we have a sufficient number of invariants, which can help to compare graphs with each other. And among the invariants there is such a characteristic of the graph as the cyclomatic number v . There are

works of [15–19], which indicate that the cyclomatic number is equal to the maximum number of independent cycles in the graph and thus becomes the characteristic of the complexity of the graph. In order to understand whether the cyclomatic number is an invariant that we can rely on, we should turn to the study such a transformation of graphs as the transformation of a vertex graph into an edge graph; of the resulting edge graph back to the vertex graph, and so on [14]. Let's call this operation as the graph conversion (Figure 2).

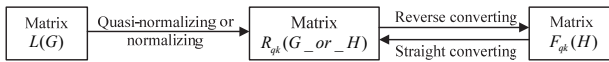


Figure 2. Graph transformation scheme

By straight conversion we'll call the operation of constructing a vertex graph from a given edge graph. An arbitrary directed graph can be subjected to the operation of the straight conversion if and only if the adjacency matrix of its vertices has a canonical ($v = \text{const}$) or quasi-canonical form ($v \uparrow$).

By the reverse conversion we'll call the operation of constructing an edge graph from a given vertex graph. A graph can be subjected to the operation of reverse conversion if and only if the adjacency matrix of its vertices has a canonical or quasi-canonical form. Both conversion operations were thoroughly discussed in [14]. It is necessary to present only two theorems.

Theorem 9. If the graph H_1 in the process of its sequential direct conversion generates only canonical graphs H_{kj} ($j = 1, 2, 3 \dots, M$), then the number of vertices of these successively obtained graphs is determined by a linear dependence on the number of the conversion operation ($j - 1$), that is

$$n_j = n_1 + \Delta n_{(j-1)}^* \tag{4}$$

Theorem 10. If the H_1 graph in the process of its consecutive straight converting generates both the canonical and the quasi-canonical graphs or only the quasi-canonical graphs, then the numbers of the vertices of these graphs, received step by step, are determined by the following expression:

$$n_j = n_1 + \sum_{\xi=1}^{\xi=(j-1)} \Delta n_{\xi}, \tag{5}$$

where

$$\Delta n_{\xi} = \Delta n_{(\xi-1)} + \Delta v(H_{(\xi-1)}), \tag{6}$$

where $\xi = 1, 2, \dots (j - 1); j = 1, 2, 3, \dots M$.

It was shown that the increase in the number of graph vertices obtained by sequential straight conversion is associated with the cyclomatic number and the type of conversion (canonical or quasi-canonical), and the increase in the cyclomatic number during this conversion depends on the structure of the graph.

The proved theorems [14] represent that all directed graphs can be divided into two classes:

- 1) graphs for which the cyclomatic number is always an invariant of the direct conversion;
- 2) graphs for which the cyclomatic number is not an invariant at some steps or at all steps of the direct conversion.

As a result of a thorough study of converting operations and determining the properties of graph structures with respect to combinations of various types of vertices and edges between them the necessary and sufficient signs of these graphs were identified. The proved theorems are given in [14]. Also, the concept of a path and a contour in a directed graph was considered more precisely. Real processes can only correspond to such circuits that have at least one “input” and at least one “output.” The concept of path and contour were already introduced much earlier [15; 16; 18], but in [14] a function was added that allows one to distinguish paths in a graph from one another. This sign was determined using the function of the sums of the degrees of the vertices through which the path passes. It turned out that these functions can be divided into two classes, which are described in [14]. Accordingly, paths can also be divided into two classes. The proved theorems are presented in [14].

The study of various paths in graphs led to the study of various combinations of intervals between the vertices of the graph [14]. The vertices of the graph were determined as the positive (one input and many outputs) one and the negative (many inputs and one output) one. In addition the vertices of the graph were also divided into the simplest (one input and one output), the simple (one/several input and several/one outputs) and complex (several inputs and several outputs). Particular attention was drawn to the interval of the l_{31} type, which has complex vertices at both ends (Figure 3, a, b).

The main feature of this interval l_{31} is that there is a negative vertex at the input end, and a positive vertex on the output end. Such an interval, during sequential conversion, first turns into a complex vertex (Figure 3, c). At the next conver-

sion step this complex vertex (one) is converted into four independent cycles (Figure 3, d). The appearance of new cycles causes an increase in the cyclomatic number. Accordingly, the complexity of the graph also grows.

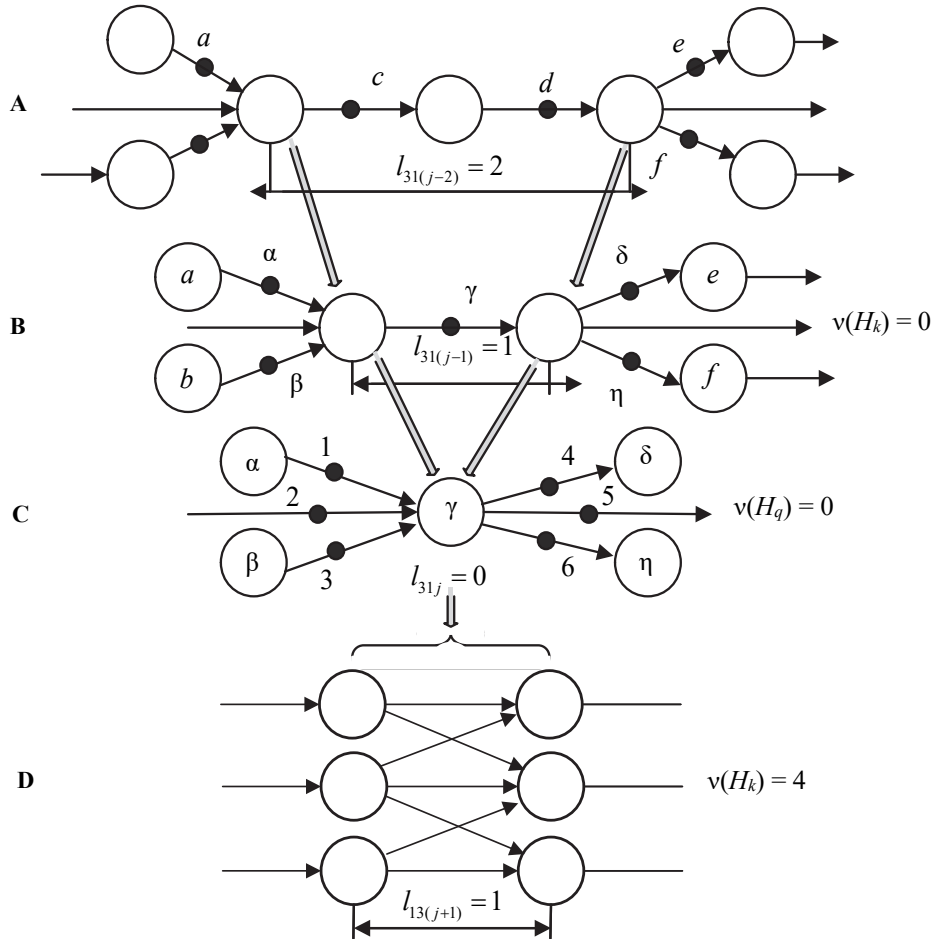


Figure 3. The transformation of the interval l_{31} into a complex vertex and the appearance of the independent cycles

As a result of research, it turned out that directed graphs can be divided into three classes (the disjoint sets):

1. **Holonomic graphs.** For them, the cyclomatic number is a regular conversion invariant, regardless of the number of sequential conversion steps. Due to this, the number of graph vertices obtained from the original graph as a result of its sequential conversion depends linearly on the number of conversion steps. These graphs should not contain contours and intervals of type l_{31} .

2. **Bounded heteronomous graphs.** Such graphs have a heteronomy boundary in terms of the number of sequential conversion steps. Until this limit is reached, the cyclomatic number is not a regular

conversion invariant. After reaching this boundary, as a result of the next conversion step, a holonomic graph is generated and the cyclomatic number becomes a regular conversion invariant regardless of the number of steps of further sequential conversion. The structure of such graphs may contain intervals of type l_{31} , but should not have contours.

3. **Progressive heteronomous graphs** do not have heteronomic boundaries in terms of the number of steps of sequential conversion. As a result, the cyclomatic number of a progressive heteronomous graph does not become a regular invariant of sequential conversion, for any, however large, number of conversion steps. The structure of such graphs contains both contours and intervals of the l_{31} type.

The comparison of graphs and algorithmic schemes

Initial graph's view	Ordered graph	No in Table 1 [14]	Complete name of algorithm's scheme
Гамильтонов граф $G^{(H)}$ при $\sum_j l_{ij} = 2$ ($j = 2, 3, \dots, (n - 1)$)	$G^{(H)}(L^{(H)})$	6	Normal single-channel two-address algorithm's flow block
	$G_K^{(H)}(R_K^{(H)})$	7	Normal single-channel two-address algorithm's flowgraph by Kaluznin
	$H_K^{(H)}(F_K^{(H)})$	8	Normal ordinary single-channel two-address algorithm's flowgraph
		9	Generalized normal single-channel two-address algorithm's flowgraph
	$D_K^{(H)}(F_K^{(H)})$	10	Normal operator single-channel two-address algorithm's flowgraph
Произвольный граф $G^{(K)}$ при $\sum_j l_{ij} = 2$ ($j = 2, 3, \dots, (n - 1)$)	$G^{(K)}(L^{(K)})$	16	Two-address algorithm's flow block with arbitrary number of channels
	$G_K^{(K)}(R_K^{(K)})$	17	Normal two-address algorithm's flowgraph by Kaluznin with arbitrary number of channels
	$H_K^{(K)}(F_K^{(K)})$	18	Normal ordinary two-address algorithm's flowgraph with arbitrary number of channels
		19	Generalized normal two-address algorithm's flowgraph with arbitrary number of channels
	$D_K^{(K)}(F_K^{(K)})$	20	Normal operator two-address algorithm's flowgraph with arbitrary number of channels
Произвольный граф G	$G(L)$	26	N -address algorithm's flow block with arbitrary number of channels
	$G_K(R_K)$	27	Normal conjugate N -address algorithm's flowgraph with arbitrary number of channels
	$H_K(F_K)$	28	Normal ordinary N -address algorithm's flowgraph with arbitrary number of channels
		29	Generalized normal N -address algorithm's flowgraph with arbitrary number of channels
	$D_K(F_K)$	30	Normal operator N -address algorithm's flowgraph with arbitrary number of channels
Полный граф G_0^*	$G_0^*(L_0^*)$	36	Complete algorithm's flow block
	$G_{0u}^*(R_{0u}^*)$	37	Normal conjugate complete algorithm's flowgraph
	$H_{0u}^*(F_{0u}^*)$	38	Normal ordinary complete algorithm's flowgraph
		39	Generalized normal complete algorithm's flowgraph
	$D_{0u}^*(F_{0u}^*)$	40	Normal operator complete algorithm's flowgraph
$G^{(K)}, G, G_0^*$	$G^{(H)}(L^{(H)})$	41	Normal algorithm's flow block (single-channel two-address)

The correspondence between graph structures and various block diagrams and graph diagrams of various algorithms (Table) is investigated in [14, chapter 4], where presented in the form of Table 1.

Conclusion

So, we can conclude that the set of all algorithms is divided into three classes (or three disjoint sets), according to the above partition of the set of directed graphs. After the operation of normalizing, the graphs, and, consequently, the algorithms, that have a similar structure, acquire the properties of recursiveness.

For the holonomic graphs, the cyclomatic number becomes an invariant. Algorithms, which after the operation of normalizing will have a similar structure, automatically receive the property of effective recursiveness and will belong to the polynomial area.

Bounded-heteronomic graphs must be subjected to some finite number of direct conversion steps in

order for the cyclomatic number to become an invariant. Algorithms with such a structure can be called reducible to a set of polynomial algorithms.

Progressively-heteronomic graphs will never have a cyclomatic number invariant. Therefore, algorithms with a similar structure will always belong to the non-polynomial area, although in particular cases the normalization operation can reduce the number of search options.

And finally, the main thing that can be said in support of $P \neq NP$ thesis.

The necessary condition: in order for the arbitrary massive task be implemented with the help of the computer, it must have a form of the ordered Koenig graph, which can be obtained by the operation of normalizing an arbitrary graph of the task.

But the sufficient condition is divided into three parts, because the arbitrary graphs are divided into three non-intersecting classes according to their structural

properties. Therefore, the algorithms that correspond to them also fall into three non-overlapping classes. There will remain a class of algorithms that cannot be reduced to the class of polynomials. They will always remain exhaustive, that is, *NP*-hard.

All this proves that $P \neq NP$.

References

1. Cook SA. The complexity of theorem-proving procedures. *Conference Record of Third Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. New York: Association for Computing Machinery; 1971. p. 151–158. <https://doi.org/10.1145/800157.805047>
2. Gary M, Johnson D. *Computing machines and intractable problems*. Moscow: Mir Publ.; 1982. (In Russ.)
3. Malinina NL. On a principal impossibility to prove $P = NP$. *International Congress of Mathematicians*. Hyderabad: Hundistan Book Agency; 2010. p. 484–485.
4. Razborov AA. Lower bounds for the polynomial calculus. *Computational Complexity*. 1998;7:291–324.
5. Yannakakis M. Expressing combinatorial optimization problems by linear programs. *Journal of Computer and System Sciences*. 1991;43:441–466.
6. Valeyev R. The lower border of complexity of algorithm of elementary *NP*-complete task. *World Applied Science Journal*. 2013;24(8):1072–1083.
7. Annala A. Physical portrayal of computational complexity. *ISRN Computational Mathematics*. 2009;2012:321372. <https://doi.org/10.5402/2012/321372>
8. Ivanov V. A short proof that *NP* is not *P*. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2014; 94(1):81–88. <http://doi.org/10.12732/ijpam.v94i1.9>
9. Dowd M. *On the provability of $P = NP$* . 2020:1–13. Preprint. Available from: https://www.researchgate.net/publication/339426546_On_the_Provability_of_PNP (accessed: 22.02.2020).
10. Church A. A note on the Entscheidungsproblem. *The Journal of Symbolic Logic*. 2014;1(1):40–41. <https://doi.org/10.2307/2269326>
11. Turing A. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*. 1937;s2-42(1):230–265.
12. Markov A, Nagorny N. *The theory of algorithms*. Boston: Kluwer Academic Publisher; 1988.
13. Glushkov VM. *Theory of algorithms*. Kiev: KVIRTU PVO; 1961. (In Russ.)
14. Malinin LI, Malinina NL. *Graph isomorphism in theorems and algorithms*. Moscow: Librocom Publ.; 2009. (In Russ.)
15. Ore O. *Theory of graphs*. Rhode Island: American Mathematical Society; 1962.
16. Berge Cl. Théorie des graphes et ses applications. *Collection universitaire de Mathématiques* (No. 2). Paris: Dunod Editeur; 1958.
17. Zykov AA. *The theory of finite graphs*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1969. (In Russ.)
18. Harary F, Palmer E. *Graphical enumeration*. London: Academic Press; 1973. <https://doi.org/10.1016/c2013-0-10826-4>
19. Harary F. *Graph theory*. New York: Basic Books; 1972.

About the author

Natalia L. Malinina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department 604, Aerospace Faculty, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamsk Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0116-5889, eLIBRARY AuthorID: 502378; malinina806@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-117-123
УДК 681.5

Научная статья / Research article

Автоматизированная система оптических измерений жидкокристаллических элементов с улучшенными характеристиками выходного сигнала

В.В. Усачев^a✉, В.В. Беляев^{a,b}, Д.Н. Чаусов^{b,c}, С.В. Мойсеенко^{a,d}

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bМосковский государственный областной университет, Мытищи, Российская Федерация

^cИнститут общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

^dАО «АЛЬФА-БАНК», Москва, Российская Федерация

✉ usachev.burevestnik@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 февраля 2022 г.

Доработана: 13 апреля 2022 г.

Принята к публикации: 30 апреля 2022 г.

Ключевые слова:

автоматизированная система, жидкий кристалл, интегральная оптика, генерация сигналов

Аннотация. Рассматривается разработанная автоматизированная система для исследования ячейки жидкого кристалла, которая состоит из аппаратной и программной частей. В отличие от ранее разработанных устройств оптических измерений жидкокристаллических элементов представленная автоматизированная система обеспечивает точность формирования сигнала в пределах 0,5 % и помехозащищенность SFDR не менее 80 дБ. Аппаратная часть системы включает разработку схемы для формирования сигнала напряжения определенной амплитуды и частоты, формирование сигналов для управления движением шагового двигателя и управления интенсивностью светового потока четырех лазерных светодиодов, разработку и трассировку печатной платы. Программная часть заключается в разработке прикладного исполнительного алгоритма, который осуществляет построение синусоидального сигнала на выходе цифро-аналогового преобразователя микроконтроллера. В качестве микроконтроллера используется STM32F746IGT6 на базе ядра ARM Cortex-M7, имеющий суперскалярную архитектуру с динамическим предсказанием, модуль защиты памяти (MPU), блок вычислений с плавающей запятой FPU, а также контроллер прямого доступа к памяти DMA (direct memory access), который используется для ускоренного обмена данными между памятью и периферией. Интерфейс DMA использовался для быстрого управления цифро-аналоговым преобразователем.

Благодарности

Работа частично выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00466, <https://rscf.ru/project/22-29-00466/>

Для цитирования

Усачев В.В., Беляев В.В., Чаусов Д.Н., Мойсеенко С.В. Автоматизированная система оптических измерений жидкокристаллических элементов с улучшенными характеристиками выходного сигнала // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 117–123. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-117-123>



Automatized system of optical measurements of liquid crystal elements with improved output signal characteristics

Vladimir V. Usachev^a✉, Victor V. Belyaev^{a,b}, Denis N. Chausov^{b,c}, Sergey V. Moyseenko^{a,d}

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

^bMoscow Region State University, Mytishi, Russian Federation

^cProkhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^dJSC "ALPHA-BANK," Moscow, Russian Federation

✉ usachev.burevestnik@yandex.ru

Article history

Received: February 17, 2022

Revised: April 13, 2022

Accepted: April 30, 2022

Keywords:

automated systems, liquid crystal, integral optics, signal generation

Abstract. The article discusses the developed automated system for the research of a liquid crystal cell, which consists of hardware and software parts. Unlike previously developed devices for optical measurements of liquid crystal elements, the automated system under consideration provides signal generation accuracy within 0.5% and SFDR noise immunity of at least 80 dB. The hardware part of the system includes the development of a circuit for generating a voltage signal of a certain amplitude and frequency, the formation of signals for controlling the movement of a stepper motor and controlling the intensity of the luminous flux of four laser LEDs, the development and tracing of a printed circuit board. The software part consists in the development of an applied executive algorithm that builds a sinusoidal signal at the output of a digital-to-analog converter of a microcontroller. This example uses the STM32F746IGT6 microcontroller based on the ARM Cortex-M7 core, which has a superscalar architecture with dynamic prediction, a memory protection module, a floating-point computing unit, as well as a direct memory access controller DMA (direct memory access), which is used for accelerated data exchange between memory and peripherals. The DMA is used to quickly control the digital-to-analog converter.

Acknowledgements

The investigation is fulfilled in part by support of Russian Science Foundation, grant No. 22-29-00466, <https://rscf.ru/project/22-29-00466/>

For citation

Usachev VV, Belyaev VV, Chausov DN, Moyseenko SV. Automatized system of optical measurements of liquid crystal elements with improved output signal characteristics. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):117–123. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-117-123>

Введение

Для разработки и эксплуатации современных жидкокристаллических (ЖК) устройств и материалов для видимого, инфракрасного (ИК) и терагерцового диапазона требуется измерение их характеристик с высокой точностью. Особенностью современных устройств является сложная форма и малая длительность электрического сигнала, управляющего оптическими характеристиками ЖК-элемента. Для лабораторных исследований ЖК-материалов и прототипов устройств на их основе требуется постоянная адаптация параметров электрического сигнала к широкому набору физических свойств ЖК (упругая деформация по Франку, диэлектрическая проницаемость, показатели преломления и др.) и эксплуатационных параметров ЖК-ячеек (диапазон

рабочих напряжений, времена переключения, углы обзора и др.).

Поэтому, несмотря на наличие различных измерительных комплексов у производственных компаний и университетов, актуальной остается задача обеспечения процесса измерений надежными, точными, адаптируемыми инструментами и методиками. Примерами таких систем являются разработки компаний Radiant Vision Systems¹, Instrument Systems², Advanced Measurement System³ и многих других.

¹ Radiant Vision Systems. URL: <https://www.radiantvisionsystems.com> (дата обращения: 02.02.2022).

² Instrument Systems. URL: <https://www.instrumentsystems.com/en> (дата обращения: 02.02.2022).

³ Advanced Measurement System. URL: <https://www.admesy.com> (дата обращения: 21.02.2022).

Развитие новых измерительных систем стимулируется и появлением нового поколения датчиков⁴. И наконец, с учетом недоступности в России многих измерительных систем для дисплеев, обусловленной среди прочих причин практическим отсутствием предприятий, производящих матричные ЖК-дисплеи, разработка таких систем является одним из компонентов реализации концепции импортозамещения. При этом следует отметить разработку и стандартизацию в России ряда методик измерения характеристик многих параметров ЖК-материалов и ячеек, особенно параметров, описывающих взаимодействие жидкого кристалла с ориентирующей поверхностью [1]. За рубежом такие стандартные методики отсутствуют.

1. Цель

Современный уровень развития индустрии и технологий поставил задачу разработки общих принципов проектирования автоматизированных систем управления, цель которых – обеспечить создание высокоэффективных систем управления, обладающих такими характеристиками, как высокая точность, быстродействие, устойчивость, низкая чувствительность к внешним воздействиям, адаптивность и управляемость.

Цель данной работы – разработка автоматизированной системы измерений электрооптических жидкокристаллических элементов с улучшенными характеристиками выходного сигнала, такими как точность формирования сигнала, помехозащищенность и низкая чувствительность к искажению входного синусоидального сигнала.

2. Методы и материалы

Основным элементом жидкокристаллических дисплеев (ЖКД) является ЖК-ячейка. Она представляет собой тонкий слой ЖК, помещенный между двумя стеклянными или пластиковыми подложками⁵.

Жидкокристаллическая ячейка используется для подачи на нее сформированного синусоидального сигнала напряжения определенной амплитуды и частоты. Амплитуда сигнала может изменяться в пределах от 5 до 40 вольт постоянного напряжения в положительной полуоси и от –40 до –5 вольт в отрицательной полуоси напряжения. Частота сигнала может изменяться в пределах от 100 кГц до 50 МГц, в зависимости от величины импульса, подаваемого на вход микросхемы, формирующей синусоидальный сигнал.

Структурная блок-схема автоматизированного комплекса для исследования ячейки жидкого кристалла представлена на рис. 1. Она состоит из оптической и информационной систем. Оптическая система включает в себя источник оптического излучения, в качестве которого выступает генератор прямого цифрового синтеза на основе микросхемы AD9843⁶, формирующей заданный оптический синусоидальный сигнал, амплитуду и частоту которого можно изменять в широком диапазоне. Объект контроля представляет собой ячейку жидкого кристалла, которая реагирует на синусоидальный сигнал под действием приложенного напряжения и переориентирует молекулы жидкого кристалла. В качестве средства измерения используется фотодиод с предварительной схемой усиления на основе операционного усилителя.

Информационная система представляет собой программный исполнительный алгоритм, который осуществляет построение синусоидального сигнала на выходе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) микроконтроллера⁷. Также информационная система реализует запись результатов измерений в отдельном файле, который можно конвертировать в табличный формат Excel и построить график по существующим контрольным точкам.

⁴ MEMS and sensors. URL: <https://www.st.com/en/mems-and-sensors.html> (дата обращения: 28.02.2022).

⁵ Liquids – sealed cells and sandwiches. URL: <https://www.internationalcrystal.net/liquids-sealed-cells-and-sandwiches> (дата обращения: 21.02.2022).

⁶ AD9834. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/205/DOC000205377.pdf> (дата обращения: 22.02.2022).

⁷ Journal of Communications Technology and Electronics. URL: <https://www.pleiades.online/ru/journal/comtech/> (дата обращения: 23.02.2022).

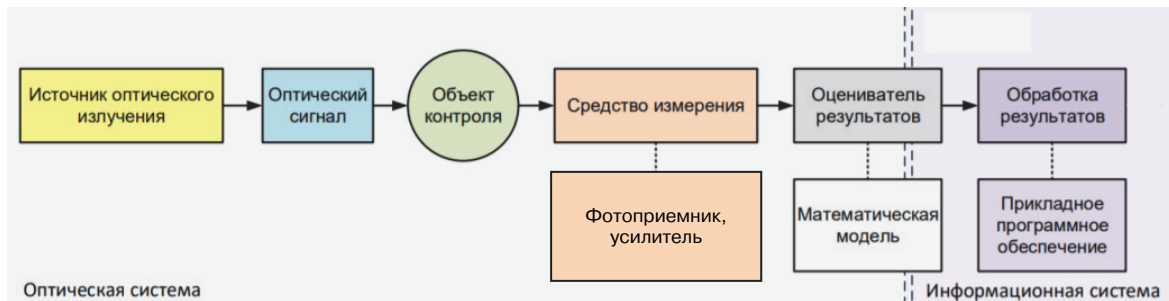


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной системы оптических измерений

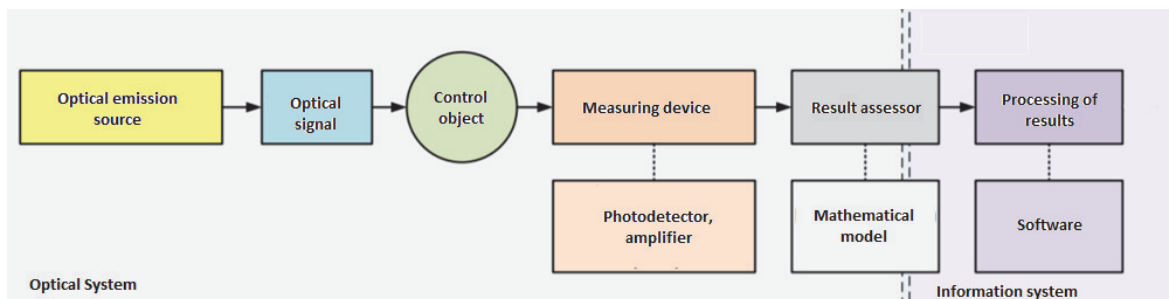


Figure 1. Structural schematic of an automated optical measurement system

3. Результаты и обсуждение

Рассмотрим создание генератора сигналов на основе микросхемы AD9834, с помощью которой можно будет формировать синусоидальный, прямоугольный и треугольный сигналы с частотой до 50 МГц. Как следует из названия, генератор сигналов может формировать различные виды сигналов заданной частоты. При этом способе любой сигнал можно сформировать в цифровом виде, а затем преобразовать его в аналоговый вид с помощью цифро-аналогового преобразователя. Чаще всего в современной электронике этот метод используется для формирования синусоидальных сигналов, но с его помощью можно формировать и прямоугольные, и треугольные сигналы, и вообще сигналы любой формы.

Для формирования синусоидального сигнала напряжения используется схема, изображенная на рис. 2. Слева на этой схеме расположен микроконтроллер, который управляет микросхемой прямого цифрового синтеза AD9834 по интерфейсу SPI (serial peripheral interface) с помощью сигнала синхронизации FSYNC, тактового сигнала SCLK и сигнала данных SDATA. Подробно со спецификацией интерфейса SPI можно ознакомиться в [2]. Питание аналоговой части и цифровой части микросхемы AD9834 осуществляется от напряжения 3,3 В,

сигналы DGND (digital ground) и AGND (analog ground) используются для подключения аналоговой и цифровой земли соответственно. Сигнал MCLK (master clock) используется для подключения внешнего тактового генератора с частотой до 50 МГц и для определения максимальной частоты выходного синусоидального сигнала.

В дополнение к этому на рис. 2 изображена микросхема AD5620, которая также управляется от микроконтроллера с помощью интерфейса SPI посредством инвертированного сигнала синхронизации SYNC, сигнала тактирования SCLK и цифрового сигнала ввода данных DIN (digital input).

Микросхема AD5620 представляет собой 12-разрядный цифро-аналоговый преобразователь с выходом по току. Чем выше разрядность преобразователя, тем он точнее. Микросхема ЦАП формирует синусоидальный токовый сигнал на выходе VOUT, который можно ограничить с помощью резистора Rset. В нашем случае сопротивление резистора составляет 6,8 кОм и с учетом внутреннего опорного напряжения V_{ref} величиной 1,2 В ограничение тока соответствует величине 3 мА⁸.

⁸ EVAL-AD9834.

URL: <https://www.farnell.com/datasheets/1905603.pdf> (дата обращения: 22.02.2022).

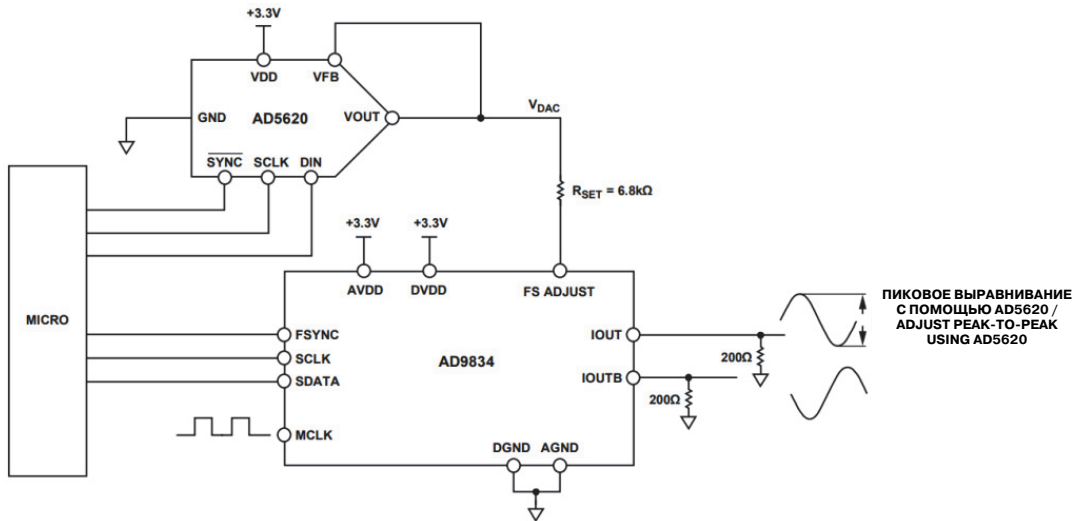


Рис. 2. Электрическая схема формирования синусоидального напряжения, построенная на микросхеме AD9834
Figure 2. Electrical circuit for the formation of a sinusoidal voltage based on the AD9834 chip

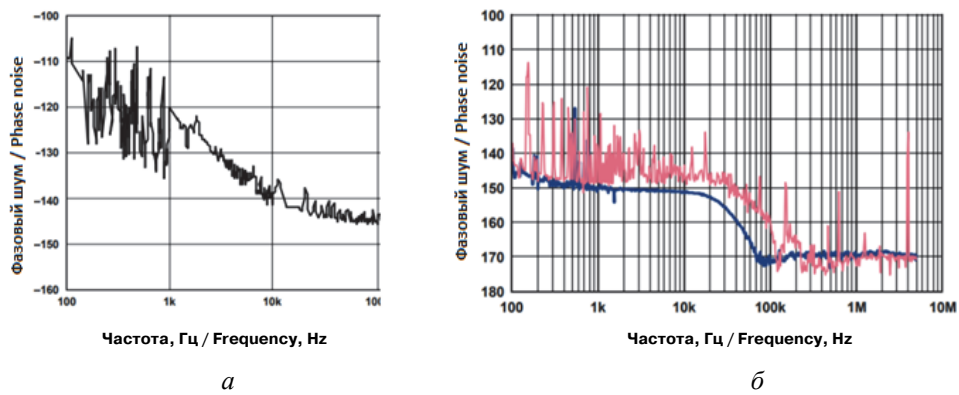


Рис. 3. Диапазон частот фазового шума выходного сигнала:
 а – микросхемы AD9834; б – микросхемы AD9102
Figure 3. The frequency range of the phase noise of the output signal:
 а – AD9834 chips; б – AD9102 chips

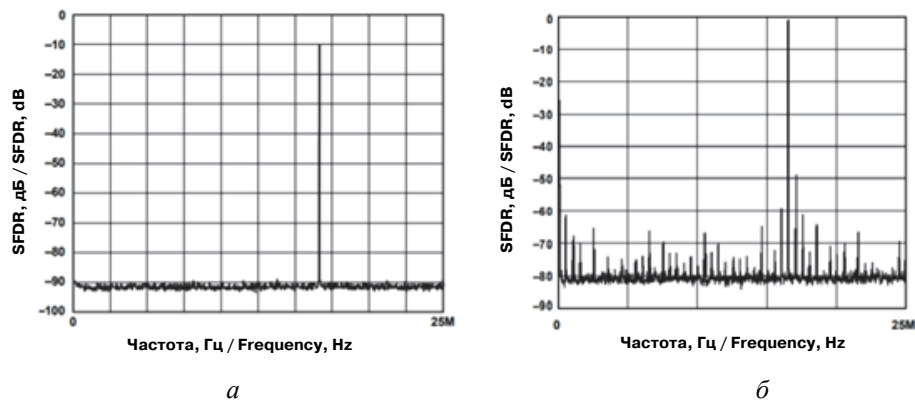


Рис. 4. Спектр выходного сигнала:
 а – микросхемы AD9834; б – микросхемы AD9830
Figure 4. The spectrum of the output signal:
 а – AD9834 chips; б – AD9830 chips

Основными параметрами микросхем прямого цифрового синтеза являются фазовый шум, джиттер – фазовое дрожание цифрового сигнала данных и SFDR – динамический диапазон, свободный от гармоник. Фазовый шум является мерой нестабильности частоты генератора на коротких промежутках времени. Он измеряется в децибелах относительно опорного сигнала при различной величине отклонения от основной частоты генерации. На рис. 3 показан спектр фазового шума, характерный для микросхемы AD9834. В сравнении с другими микросхемами прямого цифрового синтеза, например AD9102⁹, величина фазового шума в полном спектре частот у микросхемы AD9834 на порядок ниже.

Джиттер возникает за счет температурного шума, нестабильности параметров элементов генератора, внешних помех по питанию, по земле и даже через соединение выхода. Кроме того, оказывают влияние внешние магнитные и электрические поля, такие как поля от близко расположенных передатчиков. Таким образом, некоторое дрожание фазы будет присутствовать в выходном сигнале микросхемы прямого цифрового синтеза [3].

SFDR – безразмерная величина, равная отношению мощности полезного узкополосного сигнала к мощности наиболее мощной паразитной частотной составляющей. Характерный спектр выходного сигнала интегральной микросхемы AD9834 при частоте тактирования 50 МГц показан на рис. 4, а. Частота выходного сигнала составляет 1/3 от частоты тактирования – 16,67 МГц. Поэтому в данном случае в полосе 25 МГц практически отсутствуют гармоники, эффекты наложения спектров минимальны и спектр выглядит незашумленным; все максимумы в спектре как минимум на 80 дБ слабее сигнала (SFDR = 80 дБ). На рис. 4, б представлен спектр выходного сигнала микросхема AD9830 при частоте тактирования 50 МГц и выходной частоте 16,5 МГц.

Как видно из графика, в спектре сигнала имеются гораздо больше иголок и, соответственно, паразитных частотных составляющих¹⁰.

Заключение

Для исследования ячейки жидкого кристалла, применяемой в видимом, ИК и терагерцовом диапазонах, разработана автоматизированная система оптических измерений жидкокристаллических элементов. На примере микросхемы AD9834 с помощью метода прямого цифрового синтеза рассмотрено получение синусоидального аналогового сигнала за счет генерации временной последовательности цифровых отсчетов и их дальнейшего преобразования в аналоговую форму с помощью цифро-аналогового преобразователя AD5620. Указанная автоматизированная система обладает сравнительно высокими показателями помехозащищенности и помехоустойчивости выходного сигнала, которые подтверждаются сравнением графиков спектра фазового шума и выходного сигнала микросхем прямого цифрового синтеза, а следовательно, всей системы в целом.

Список литературы

1. Беляев В.В., Чилая Г.С. Жидкие кристаллы в начале XXI века. М.: ИИУ МГОУ, 2015. 136 с.
2. Лапин А.А. Интерфейсы. Выбор и реализация. М.: Техносфера, 2005. 168 с.
3. Бондаренко М.В., Слюсар В.И. Влияние джиттера АЦП на точность пеленгации цифровыми антенными решетками // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2011. Т. 54. № 8. С. 41–49.

References

1. Belyaev VV, Chilaya GS. *Liquid crystals at the beginning of the 21st century*. Moscow: MRSU Publ.; 2015. (In Russ.)
2. Lapin AA. *Interfaces. Selection and implementation*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2005. (In Russ.)
3. Bondarenko MV, Slyusar VI. The influence of ADC jitter on the accuracy of direction finding by digital antenna arrays. *Izvestiya of Higher Educational Institutions. Radio Electronics*. 2011;54(8):41–49. (In Russ.)

⁹ AD9102. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/442/DOC011442569.pdf> (дата обращения: 21.02.2022).

¹⁰ Signal Spectrum. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/signal-spectrum> (дата обращения: 21.02.2022).

Сведения об авторах

Усачев Владимир Владимирович, аспирант, кафедра нанотехнологий и микросистемной техники, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-1616-7062; usahev.burevestnik@yandex.ru

Беляев Виктор Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; заведующий кафедрой теоретической физики, Московский государственный областной университет, Российская Федерация, 141014, Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24; ORCID: 0000-0003-0553-9358, eLIBRARY SPIN-код: 5730-0900; belyaev-vv@rudn.ru

Чузов Денис Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий учебно-научной лабораторией теоретической и прикладной нанотехнологии, профессор кафедры теоретической физики, Московский государственный областной университет, Российская Федерация, 141014, Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24; старший научный сотрудник, Институт общей физики имени А.М. Прохорова, Российская академия наук, Российская Федерация, Москва, ул. Вавилова, д. 38; ORCID: 0000-0002-1287-6427, eLIBRARY SPIN-код: 3866-5362; d.chausov@yandex.ru

Мойсеенко Сергей Владимирович, аспирант, кафедра нанотехнологий и микросистемной техники, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ведущий специалист, АО «АЛЬФА-БАНК», Российская Федерация, 107078, Москва, ул. Каланчевская, д. 27; ORCID: 0000-0002-8555-4234; cormorant.xiii@gmail.com

About the authors

Vladimir V. Usachev, PhD student, Department of Nanotechnology and Microsystem Technology, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1616-7062; usahev.burevestnik@yandex.ru

Victor V. Belyaev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Technology, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; Professor of the Theoretical Physics Department, Moscow Region State University, 24 Very Voloshinoy St, Mytishi, 141014, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0553-9358, eLIBRARY SPIN-code: 5730-0900; belyaev-vv@rudn.ru

Denis N. Chausov, D.Sc., Head of Theoretical and Applied Nanotechnology Laboratory, Professor of the Theoretical Physics Department, Moscow Region State University, 24 Very Voloshinoy St, Mytishi, 141014, Russian Federation; senior researcher, Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 38 Vavilova St, Moscow, 119991, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1287-6427, eLIBRARY SPIN-code: 3866-5362; d.chausov@yandex.ru

Sergey V. Moiseenko, PhD student, Department of Nanotechnology and Microsystem Technology, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; leading specialist, Joint Stock Company "ALPHA-BANK," 27 Kalanchevskaya St, Moscow, 107078, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8555-4234; cormorant.xiii@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-124-139
УДК 69.001.5:69.033.6:69.07

Научная статья / Research article

Некоторые аспекты исследования возможности строительства АЭС на Луне

В.В. Белов^{ID}, С.А. Сазонова^{ID}✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация
✉ s.sazonovaa17@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 11 апреля 2022 г.
Доработана: 15 июня 2022 г.
Принята к публикации: 18 июня 2022 г.

Ключевые слова:

концепт, архитектурно-строительное решение, стационарный, АЭС, Луна, защитный купол, строительство, этапы строительства, ядерные установки, ракетоносители, жизненный цикл

Аннотация. Вопрос освоения космического пространства является приоритетным в развитии любого крупного государства, так как, решая технологические задачи, приводит к будущему прогрессу. Очевидно, что такое освоение невозможно без устройства устойчивого источника энергии непосредственно в космическом пространстве. Материалы исследования посвящены концептуальному изучению возможности строительства стационарной АЭС на Луне. Проведен обзор открытых источников информации на наличие уже существующих или находящихся на стадии разработки ядерных энергетических установок, способных работать в «лунных условиях», а также отвечающих требованиям безопасной эксплуатации и утилизации, подобраны конкретные модели ракетоносителей тяжелого и сверхтяжелого класса (существующие и концептуальные), при помощи которых возможно транспортировать до Луны полезную нагрузку величиной от 10 т и более. На основании анализа данных о реакторных установках и сведений об условиях эксплуатации и строительства на Луне сформировано концептуальное решение «многоразовой» ограждающей конструкции стационарной АЭС на Луне, которая выполняет роль защиты от падения космических тел, радиационных амплитудных колебаний и солнечного излучения (тепла солнечного света). Представлены основные принципиальные концепты этапов строительства, эксплуатации и утилизации, для которых показана проблематика создания, развития и утилизации ядерных установок и стационарной ограждающей конструкции АЭС в условиях отсутствия атмосферы (космического тела), существующих на данный момент и требующих исследования в течение ближайшего десятилетия.

Для цитирования

Белов В.В., Сазонова С.А. Некоторые аспекты исследования возможности строительства АЭС на Луне // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 124–139. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-124-139>

Some aspects of the possibility of building a nuclear power plant on the Moon

Vyacheslav V. Belov^{ID}, Svetlana A. Sazonova^{ID}✉

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation
✉ s.sazonovaa17@mail.ru

Article history

Received: April 11, 2022
Revised: June 15, 2022
Accepted: June 18, 2022

Abstract. The problem of space exploration is a priority in the development of any large state, because it solves the problems of future technological progress. Obviously, such development is not possible without a stable energy source directly in outer space. Materials of this work are devoted to



Keywords:

concept, architectural solution, construction solution, stationary, nuclear power plant, Moon, protective dome, construction, construction stages, nuclear installations, launch vehicles, life cycle

a conceptual study of the possibility of building a stationary nuclear power plant (NPP) on the Moon. A review of open sources of information on the availability of already existing or under development nuclear power plants capable of operating in the “Lunar environment,” as well as meeting the requirements of safe operation and future utilization, selected specific models of heavy and superheavy-class carrier rockets (existing and conceptual) with the ability to transport payloads of 10 tons or more to the Moon. Based on the analysis of data on reactor plants and information on operating and construction conditions on the Moon, a conceptual solution of “re-usable” enclosing structure of stationary NPP on the Moon, which serves as protection from falling space bodies, radiation and solar radiation, is formed. The main principal concepts of the stages of construction, operation and utilization of a stationary NPP on the Moon are presented. The problems of creation, development and utilization of stationary sources of nuclear energy in the absence of atmosphere (space), existing at the moment and requiring investigation during the nearest decade, are shown.

For citation

Belov VV, Sazonova SA. Some aspects of the possibility of building a nuclear power plant on the Moon. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):124–139. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-124-139>

Введение

Освоение космического пространства является приоритетной государственной задачей России, Китая, США, Франции, Японии¹. Однако развитие и освоение космоса невозможно без устойчивого относительно мощного источника (на поверхности космического тела) энергоснабжения и его организации непосредственно в космическом пространстве² [1]. Очевидно, что из суще-

ствующих стабильных технологий наиболее перспективна атомная энергетика³ [2–4].

С этой позиции в качестве испытательного полигона для обкатки технологий строительства АЭС может рассматриваться Луна [5]. Так, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA, США) открыло сбор предложений по созданию к 2030 г. ядерно-энергетического реактора на Луне⁴ [6; 7], а госкорпорация «Роскосмос» уже предложила проект лунной базы с мини-АЭС под названием Patron Moon⁵.

В настоящее время большинство концептов атомных решений в космосе сводится к изготовлению сосредоточенных и полнокомплектных установок [8], мощность которых весьма ограничена по ряду причин, среди которых, напри-

¹ Федеральная космическая программа России на 2016–2025 гг., утвержденная постановлением Правительства РФ от 23 марта 2016 г. № 230. URL: <https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения: 15.03.2022); Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ от 19.04.2013 г. № Пр-906). URL: <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6813088/content.html> (дата обращения: 15.03.2022); BEIJING, Jan. 28 (Xinhua) – The State Council Information Office of the People’s Republic of China published a white paper titled “China’s Space Program: A 2021 Perspective” on Friday. URL: <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6813088/content.html> (дата обращения: 15.03.2022); United States Space Priorities Framework. Washington, The White House – December 2021. URL: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/12/United-States-Space-Priorities-Framework-December-1-2021.pdf> (дата обращения: 15.03.2022); The US Space Program: What Does NASA Do? URL: <https://www.masterclass.com/articles/what-does-nasa-do#what-is-nasa> (дата обращения: 15.05.2022); The birth of the French space program. URL: <https://www.spacelegalissues.com/space-law-the-birth-of-the-french-space-program/> (дата обращения: 15.05.2022); Japan’s Space Program a fork in the road? URL: https://www.rand.org/pubs/technical_reports/TR184.html (дата обращения: 15.05.2022).

² Федеральная космическая программа России на 2016–2025 гг., утвержденная постановлением Правитель-

ства РФ от 23 марта 2016 г. № 230. URL: <https://www.roscosmos.ru/22347/> (дата обращения: 28.02.2022).

³ Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу (утв. Президентом РФ от 19.04.2013 г. № Пр-906). URL: <http://www.cnsa.gov.cn/english/n6465652/n6465653/c6813088/content.html> (дата обращения: 15.03.2022); *Сухарева И.* Без атомной энергии галактики не освоить. URL: https://atomicexpert.com/spacenuclear_technologies (дата обращения: 15.03.2022).

⁴ NASA открыла сбор предложений по созданию к 2030 г. ядерно-энергетического реактора на Луне. URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2021/11/23/119652> (дата обращения: 28.02.2022).

⁵ Предприятие Роскосмоса планирует сдавать в аренду лунную базу с мини-АЭС. URL: <https://ria.ru/20191013/1559716502.html> (дата обращения 28.02.2022).

мер, полезная нагрузка, выводимая ракетопосредителем. В результате подобный подход не позволяет защитить установки должным образом на местах базирования в космическом пространстве, а также наладить их эффективную будущую эксплуатацию и утилизацию. С другой стороны, освоение космоса так или иначе потребует организацию и более мощных станций за счет дополнительного возможного развертывания производств на территории иных космических тел⁶ [9–11].

Целью данной работы является исследование концептуальных возможностей строительства стационарной АЭС на Луне в качестве первичного испытательного полигона мощностью, превосходящей мощность одной комплектной установки, с учетом существующих доступных технологий.

1. Методы и материалы

Для достижения поставленной цели произведен анализ открытых источников информации для выбора наиболее приемлемых технологий по выработке тепловой и электрической энергии на атомных реакторах, из числа тех, что способны работать в лунных условиях. Аналогичный анализ выполнен для ракетопосредителей, с целью определения полезной нагрузки вывода на орбиту Луны.

Конструктивное решение стационарной АЭС предложено на основании анализа и синтеза информации, полученной из открытых источников, а также с учетом логических предположений о способах создания групповой системы установок (их доставка и прилунение), сооружения защитной конструкции (путем оценки достаточности мощности рабочих приводов техники), будущей утилизации (изъятие без разрушения защитной постройки и вывод на орбиту утилизации установок, отработавших свой срок), на основании оценки вероятности падения метеоритов в пятно размещения сооружения и нагрузки от них. Полученная концепция полностью базируется на изучении и обобщении научной и научно-технической информации с некоторыми расчетными оценками, выполненными непосредственно ав-

торами. *Объект исследования* – возможность строительства стационарной АЭС на Луне с учетом существующих и разрабатываемых в настоящее время технологий. *Предмет исследования* – концептуальная оценка архитектурно-строительных решений (в первом приближении) для стационарной АЭС на Луне с учетом транспортировки основного технологического оборудования, его защиты при работе, а также дальнейшей утилизации.

2. Результаты

В качестве энергетических атомных реакторов для строительства АЭС на Луне изучены существующие и разработанные (или находящиеся в стадии разработки) установки, а именно: SNAP-10A, «Ромашка», «Бук», ERATO, «Топаз-1», «Топаз-2», «Енисей», SAFE-400, KiloPower и ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса (ЯЭДУ). Анализ применимости той или иной установки для использования ее в качестве стационарной для АЭС на Луне, выполнен на основе «концепции NASA для лунной базы с ядерной электрической установкой, включающей следующие требования: система должна работать автономно и при помощи управления человеком; ресурс установки – не менее 5 лет; требуемая электрическая единичная мощность установки – 30 кВт; масса – до 2000 кг; габариты – не должны превосходить размеры обтекателя ракетного носителя типа „Протон-М“ (высота × диаметр – 13,9×4,35 м); уровень надежности – вероятность безотказной работы в течении 5 лет должна превышать 90 % с учетом возможного метеоритного повреждения»⁷ и «Принципов, касающихся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве», принятых Генеральной Ассамблеей ООН в 1992 г. (Резолюция 47/68 от 14.12.1992 г.)⁸, а также исходя из логических требований к внешней защите от метеоритного потока, амплитудных колебаний радиации и теплового излучения, организации теплоотвода и способа получения

⁶ Министерство энергетики и НАСА подписали меморандум о взаимопонимании. URL: <https://www.energy.gov/articles/department-energy-and-nasa-sign-memorandum-understanding> (дата обращения: 28.02.2022).

⁷ Ядерные энергетические установки прямого и машинного преобразования энергии космического и напланетного назначения. Состояние, проблемы, перспективы. URL: <https://ppt-online.org/237070> (дата обращения 15.03.2022).

⁸ Принципы, касающиеся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/outer-space_nucpower.shtml (дата обращения: 15.03.2022).

энергии, возможной будущей утилизации самих установок.

Установлено, что наилучшим образом требованиям NASA соответствуют следующие установки: «Енисей» (Россия, год начала разработки – 1992 г. [12]); SAFE-400 (Safe Affordable Fission Engine, США, год начала разработки – 2002 г.) [13]; KiloPower (США, год начала разработки – 2015 г.)⁹. Оценка в части соответствия требованиям «Резолюции 47/68» от 14.12.1992 г. возможна только для установок SNAP-10A (США, 1965 г.) [14]; «Ромашка» (СССР, 1964 г.) [12]; «Бук» (СССР, 1969 г.)¹⁰; «Топаз-1» (СССР, 1987 г.) [15]; «Енисей» (Россия, 1992 г.) [12] и ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса (ЯЭДУ) (Россия, 2016 г.)¹¹. Перечисленные установки, за исключением SNAP-10A [14], соответствуют требованиям «Резолюции 47/68», так как имеют возможность автоматического управления, могут быть выведены на орбиту захоронения, а также утилизированы по истечению срока эксплуатации. Подобная оценка остальных установок невозможна в силу отсутствия необходимой информации о них в открытых источниках.

Следует отметить, что рассмотренные установки не имеют защиты от падения космических тел и дополнительной радиационной защиты от внешних амплитудных возмущений, следовательно, существует прямая необходимость в организации такой защиты.

Исходя из основного принципа действия ядерных энергетических установок и способов получения электрической энергии, можно выделить установки, использующие при выработке электрической энергии теплоноситель, например эвтектичный натрий-калиевый сплав (NaK), такие как SNAP-10A [14], «Бук», «Топаз-1» [15], «Енисей» [12]). К установкам, выработка электрической энергии в которых происходит «контактным» образом за счет термоэлектрических генераторов (в частности, на основе высокотемператур-

ных полупроводников из кремний-германиевого сплава), при этом непреобразованная в электрическую энергию часть тепла отводится ребрами-излучателями, и частичным задействованием для «контактного поджига» элементов гелия, можно отнести «Ромашку» (рассматривалась в СССР в качестве стационарного реактора на Луне) [12]. SAFE-400 [13] и ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса используют газовую смесь гелия и ксенона в качестве теплоносителя, а KiloPower использует натриевый теплоноситель.

По своему принципу действия установки делятся на реакторы, работающие: 1) на «тепловых» («медленных») нейтронах – SNAP-10A [14], «Топаз-1» [15], KiloPower; 2) «быстрых» нейтронах – «Ромашка» [12], «Бук», SAFE-400 [13], ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса; 3) «промежуточных» нейтронах – «Енисей» [12].

Отдельно стоит выделить систему ERATO (Франция, 1980-е гг.), включающую три различные силовые установки: реактор на «быстрых» нейтронах с натриевым теплоносителем и топливом из оксида урана, работающий при температуре около 670 °С; высокотемпературный реактор с газовым охлаждением (с «тепловым» или «надтепловым» спектром нейтронов), работающий при температуре около 840 °С; реактор на «быстрых» нейтронах без литиевого охлаждения, работающий при температуре 1150 °С¹².

По мощности установки делятся на маломощные – до 1 кВт (SNAP-10A [14], «Ромашка», однако для нее предложена конструктивная модернизация с повышением мощности до 3–5 кВт); средней мощности – от 3–7 кВт («Бук», «Топаз-1», «Енисей»); мощные – от 7 кВт и выше (KiloPower, ERATO, SAFE-400 и ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса). Масса-габаритные характеристики, для рассматриваемых установок позволяют их классифицировать следующим образом: малогабаритные – с массой до 1000 кг и длиной установки до 2 м (SNAP-10A [14], «Ромашка» [12], «Бук», KiloPower, SAFE-400 [13]); среднегабаритные – массой от 1 000 до 2 000 кг

⁹ NASA успешно испытало ядерный реактор для лунной базы. URL: <https://nplus1.ru/turbopages.org/nplus1.ru/s/news/2018/05/02/kilopowertes> (дата обращения: 28.02.2022).

¹⁰ Бук (ядерная энергетическая установка). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бук_\(ядерная_энергетическая_установка\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бук_(ядерная_энергетическая_установка)) (дата обращения: 28.02.2022).

¹¹ Ядерные энергетические установки прямого и машинного преобразования энергии космического и напланетного назначения. Состояние, проблемы, перспективы. URL: <https://ppt-online.org/237070> (дата обращения 15.03.2022).

¹² Nuclear reactors and radioisotopes for space (updated May 2021)». URL: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-reactors-for-space.aspx#:~:text=Radioisotope%20power%20sources%20have%20been,source%20for%20deep%20space%20missions> (дата обращения: 15.03.2022).

и длиной от 2 до 5 м («Топаз-1» [15], «Енисей» [12]); крупногабаритные – массой свыше 2 000 кг и длиной более 5 м (ERATO¹³, ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса, при этом стоит отметить, что длина (высота) ЯЭДУ составляет – 53,4 м). По планируемому сроку службы: до 1 года – SNAP-10A [14], «Бук», ERATO, «Топаз-1» [15]; до 2 лет – «Ромашка» (подтвержденный испытаниями ресурс – 15 000 ч) [12]; до 5,5 лет – «Енисей» [12]; до 10 лет – SAFE-400 [13], KiloPower, ядерная энергодвигательная установка мегаваттного класса.

На основании выполненного анализа наиболее перспективными из существующих на данный момент ядерных установок для использования в условиях Луны в качестве стационарной АЭС являются установки с реакторами на быстрых нейтронах, использующими газовые теплоносители и «контактные» способы выработки на полупроводниках (такие как «Ромашка», SAFE-400 и т. д.). Следует отметить, что одним из преимуществ «Ромашки» является работоспособность реактора при температуре ядра до 1900 °С [12]. В качестве преобразователей электрической энергии эффективны термоэлектрические генераторы, так как они основаны на прямом преобразовании тепловой энергии в электрическую с использованием полупроводниковых элементов или двигателей Стирлинга. Ввиду того, что все рассмотренные установки обладают малой единичной мощностью относительно экономических требований NASA и отсутствует какая-либо информации о проверке надежности их работы в условиях падения космических камней и метеоритов, предполагается групповое размещение установок. Технология получения электрической энергии с использованием термоэлектрических генераторов и двигателей Стирлинга позволяет осуществить такое групповое размещение с реализацией единой внешней защиты от падения метеоритов, космических камней, а также радиационной защиты от амплитудных возмущений в космиче-

ском пространстве, что гарантирует работоспособность и надежность работы АЭС в условиях Луны.

В качестве дальнейшего рассмотрения типов ракетносителей и конструкции внешней защиты для ядерной установки, реализованной в самостоятельном полетном модуле, приняты следующие средние масса-габаритные характеристики: масса – до 1200 кг (2000 кг), длина – около 4900 мм, максимальный диаметр – 1800 мм. Единичная мощность установок принята в 5 кВт с гарантированным сроком эксплуатации 5 лет. Мощность и средний срок эксплуатации модулей принят на основании анализа существующих ядерных энергетических установок. Полетный модуль также должен включать в себя блок инверторов (преобразователей), баки с запасом топлива, блок двигателей, а также шасси для самостоятельного передвижения по поверхности Луны.

В таблице приводится анализ основных существующих (и концептуальных) грузовых ракетносителей достаточной мощности для транспортировки грузов (строительных узлов) и техники (роботов) на Луну для возведения стационарной АЭС. Исходя из массогабаритных характеристик реакторных установок наиболее подходящим грузовым ракетносителем будет ракета «Энергия» (СССР), из зарубежных аналогов – ракетноситель тяжелого класса «Сатурн-5» (США).

Учитывая грузоподъемность существующих ракетносителей (см. таблицу), а также особенности выбранной ЯЭУ, предложена концептуальная конструкция стационарной АЭС, которая в свою очередь базируется на геометрических параметрах принятых выше модулей, необходимости в защите установок и отвода тепла от них в процессе работы, возможностях возведения в условиях Луны существующими технологиями (планируемыми в ближайшей перспективе), предельной мощности используемой техники (в частности, луноходов). Так, в первом приближении принято объемно-планировочное решение купольной конструкции с высотной отметкой над поверхностью планировки +8,500 м, общим диаметром 23,2 м, при количестве размещаемых в одной конструкции установок до 12 шт. (общая мощность – 60 кВт, с двойным резервированием относительно требований NASA).

¹³ Nuclear reactors and radioisotopes for space (updated May 2021)». URL: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-reactors-for-space.aspx#:~:text=Radioisotope%20power%20sources%20have%20been,source%20for%20deep%20space%20missions> (дата обращения: 15.03.2022).

Анализ существующих и разрабатываемых грузовых ракетносителей, способных доставить грузы на Луну¹⁴

№	Название	Состояние	Масса полезной нагрузки, перемещаемой до траектории на Луну, т	Космодром
1	«Сатурн-5»	Последний запуск был в 1973 г.	43,5	Стартовый комплекс LC-39, Космический центр имени Джона Ф. Кеннеди (КЦ Кеннеди)
2	«Энергия»	Последний запуск был в 1988 г.	32	Байконур
3	SpaceX Starship	В разработке, 2024 г.	50	SpaceX LC, Техас LC-39A, LC-49
4	Falcon Heavy	Последний запуск был в 2019 г.	16,8	LC-39A, КЦ Кеннеди SLC-4E, Ванденберг
5	Falcon 9	Последний запуск был 25 февраля 2022 г.	4	SLC-40, мыс Канаверал SLC-4E, Ванденберг LC-39A, КЦ Кеннеди
6	H1	Все запуски были неудачными	5,56	Байконур
7	«Енисей» 2028	В разработке, 2028 г.	27	Восточный
8	Launch System Space	В разработке, 2022 г.	45	LC-39, КЦ Кеннеди
9	«Чанчжэн-9»	На стадии проектирования	50	–
10	«Дон»	На стадии проектирования	32	Восточный
11	«Вулкан»	Был в разработке до 1987 г.	43	Байконур
12	«Протон М»	Последний запуск был 13 декабря 2021 г.	5,7	Байконур

Analysis of existing and developing rocket systems that can deliver cargoes to the Moon¹⁵

No.	Name	Status	Weight of payload moved to the track to the Moon, t	Cosmodrome
1	"Saturn-5"	The last start was in 1973	43.5	Launch Complex 39 (LC-39), The John F. Kennedy Space Center
2	"Energiya"	The last start was in 1988	32	Baikonur
3	SpaceX Starship	In the works, 2024	50	SpaceX LC, Texas LC-39A, LC-49
4	Falcon Heavy	The last start was in 2019	16.8	LC-39A, The John F. Kennedy Space Center SLC-4E, Vandenberg Space Force Base
5	Falcon 9	The last startup was on February 25, 2022	4	SLC-40, Cape Canaveral SLC-4E, Vandenberg Space Force Base LC-39A, The John F. Kennedy Space Center
6	H1	All the starts were unsuccessful	5.56	Baikonur
7	"Enisej"	In the works, 2028	27	Vostochny
8	Launch System Space	In the works, 2022	45	LC-39, The John F. Kennedy Space Center
9	"Chanchzhen-9"	In the design stage	50	–
10	"Don"	In the design stage	32	Vostochny
11	"Vulkan"	Was in development until 1987	43	Baikonur
12	"Proton M"	The last startup was on December 13, 2021	5.7	Baikonur

¹⁴ Ракеты-носители. URL: <https://www.roscosmos.ru/33/> (дата обращения: 28.02.2022); Перспективный ряд ракет-носителей. URL: <http://www.buran.ru/hm/38-3.htm> (дата обращения 28.02.2022).

¹⁵ Booster rocket. Available from: <https://www.roscosmos.ru/33/> (accessed: 28.02.2022); Perspective range of booster rockets. Available from: <http://www.buran.ru/hm/38-3.htm> (accessed: 28.02.2022).

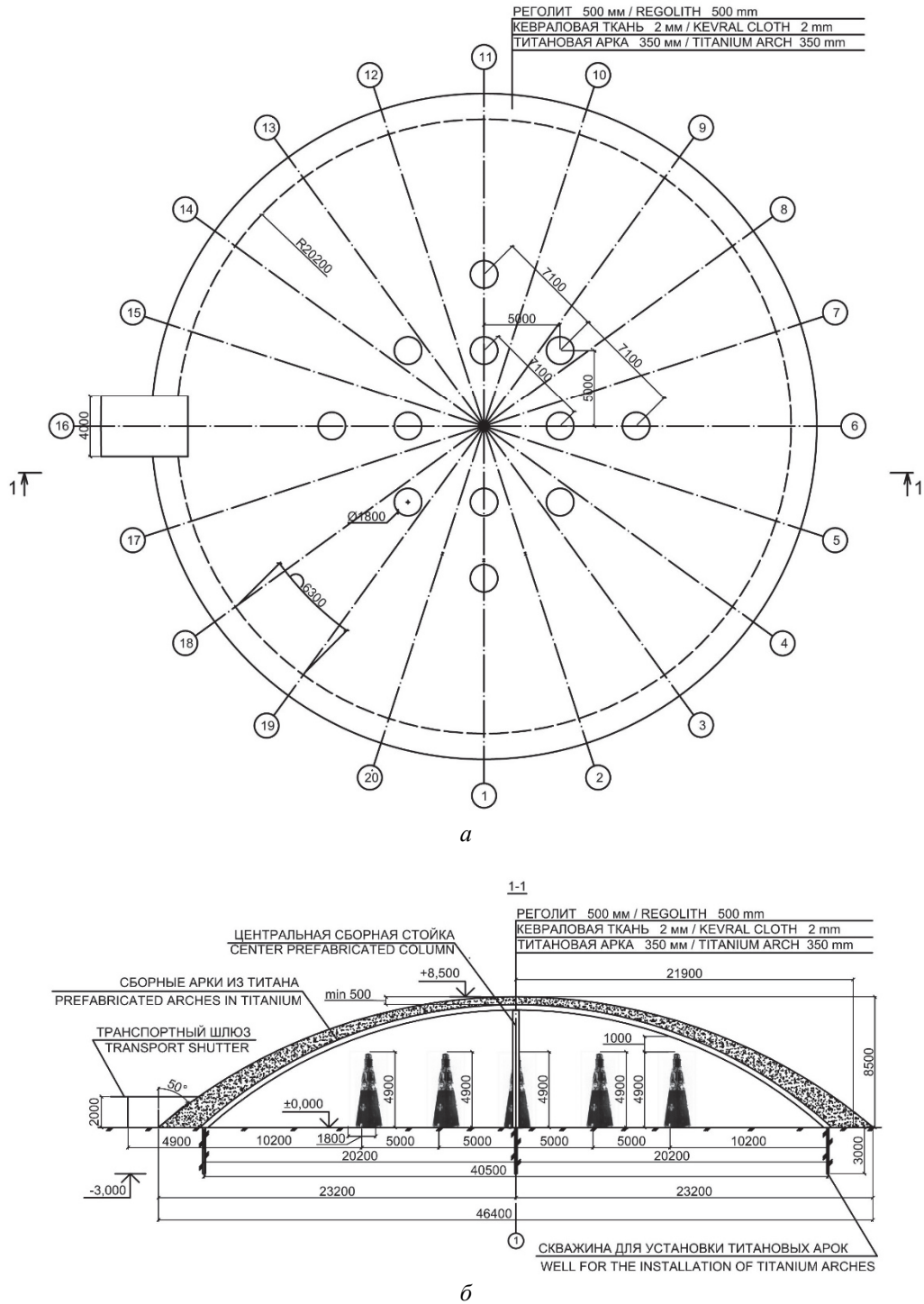


Рис. 1. Ограждающая защитная конструкция АЭС для установки на Лунной поверхности (диаметр скважин принят равным 160–170 мм, глубина – 3000 мм):

Figure 1. Enclosing protective structure of the nuclear power plant for installation on the Lunar surface (the diameter of the boreholes is taken equal to 160–170 mm, depth – 3000 mm):
 а – план; б – продольный разрез¹⁶

¹⁶ Бурение на Луне. URL: <http://byrim.com/burenie/13.html> (дата обращения: 28.02.2022).

¹⁷ Moon drilling. Available from: <http://byrim.com/burenie/13.html> (accessed: 28.02.2022).

Количество объединяемых в группу ЯЭУ зависит от безопасности совместной работы, потребности в мощности (электрической энергии) для их потребителей. Расстояние между установками принято из условий их безопасной эксплуатации, а также транспортных перемещений и равно – 3 м. Купол оснащается транспортным шлюзом диаметром 2 м, который служит для многоразового использования самого сооружения при условии эксплуатационной замены оборудования. В качестве ограждающей конструкции используется покрытие из кевларовых нитей (или ткани на основе этих нитей), хорошо воспринимающих динамические нагрузки, которое можно возвести в условиях Луны, и насыпь местного грунта – реголита, являющегося защитой от космической радиации и тепловых перепадов [16–19]. Несущая конструкция выполняется в виде арок из титана с центральной поддерживающей стойкой (круглого сечения диаметром 150 мм¹⁸, рис. 1). Основным параметром, на котором основываются геометрические размеры купола, является верхняя отметка над уровнем дневной поверхности Луны, которая в первую очередь определяется принятой геометрией реакторных электрических модулей, а также возможностями луноходов при возведении АЭС (их необходимой мощности). Жесткая конструкция несущих элементов купола обусловлена необходимостью многоразового использования, снижением зависимости от амплитудных температурных колебаний и внешних деформаций поверхности Луны [16]. Отвод избытка тепла при выработке энергии предусматривается частичным радиационным поглощением самим реголитом [20; 21].

Риск падения космических тел на купол стационарной АЭС радиусом 23,2 м оценен из расчета среднего количества камней, падающих на поверхность Луны за сутки, а нагрузка от них – исходя из средней массы одного камня и его приближенной скорости столкновения. Так, масса космических камней, падающих на Луну в сутки, составляет 2700 кг¹⁹; количество космических камней, падающих на Луну в сутки, – 100 000 шт.²⁰;

средняя масса одного космического камня, падающего на Луну в сутки, может быть определена из отношения массы всех камней, падающих за сутки, к их количеству и составит 0,027 кг/сут. Площадь поверхности Луны²¹ – $3,793 \cdot 10^{13}$ м². Разделив количество камней, падающих на ее поверхность в сутки, можно получить количество космических камней, падающих на единицу площади поверхности Луны, которое составляет в сутки $2,64 \cdot 10^{-9}$ шт./м²·сут). Площадь поверхности защитного купола радиусом 23,2 м и высотой 8,5 м равна 1602,21 м². Следовательно, вероятность падения одного космического камня в сутки на единицу площади купола будет определяться произведением площади поверхности купола на количество падающих космических камней в единицу площади и времени и составит $4,23 \cdot 10^{-6}$ (м²·сут). Исходя из этого, количество космических камней, которые упадут в течение всего срока эксплуатации группы ядерных установок при расчетном сроке в 5 лет, составит $7,72 \cdot 10^{-3}$ шт./м²·ср. эксл.). Согласно «Рекомендациям по применению принципов и способов противоаварийной защиты в проектах строительства»²², события с вероятностью выше $1 \cdot 10^{-3}$ (событий/год) относятся «к области недопустимого риска, требующего обязательного выполнения мер по его снижению, невзирая на размер финансовых затрат»²³; следовательно, необходимо принять меры по снижению рисков падения космических камней, а значит – предусмотреть внешнюю защиту установок. Средняя масса космических камней, падающих на Луну в сутки, а единицу площади составит $7,12 \cdot 10^{-16}$ кг. Умножив это значение на площадь поверхности купола, можно получить среднюю массу этих тел, которая будет приходиться на площадь защитного купола в сутки – $1,14 \cdot 10^{-13}$ кг. Средняя скорость падения камней составляет 25 000 м/с²⁴; следовательно, сила, с которой падают космические камни в единицу времени на единицу площади, составляет 675 Н/с.

²¹ Луна. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Луна> (дата обращения: 28.02.2022).

²² Рекомендации по применению принципов и способов противоаварийной защиты в проектах строительства. Методические подходы. М.: Москомархитектура, 2004.

²³ Там же.

²⁴ Луна.

URL: <http://selena.sai.msu.ru/Home/SolarSystem/moon/moon.htm> (дата обращения: 28.02.2022).

¹⁸ Бурение на Луне. URL: <http://byrim.com/burenie/13.html> (дата обращения: 28.02.2022).

¹⁹ Луна. URL: <http://selena.sai.msu.ru/Home/SolarSystem/moon/moon.htm> (дата обращения: 28.02.2022).

²⁰ Там же.

Таким образом, квазистатическая нагрузка от падающего камня будет определяться по формуле

$$P = FK_{\text{дин}}, \quad (1)$$

где F – средняя сила, с которой падают космические камни в единицу времени на единицу площади защитного купола (определена выше), кН; $K_{\text{дин}}$ – коэффициент динамичности, равный 1,4.

Для оценки в первом приближении защитных свойств кевлара сравним расчетное сопротивление растяжению кевлара с силой от падающих космических камней и весом реголитной засыпки:

$$R_{\text{кевлара}} > P/A + \rho t \operatorname{tg} \theta_0, \quad (2)$$

где $R_{\text{кевлара}}$ – расчетное сопротивление растяжению кевлара, принято равным 3250 МПа²⁵; P – квазистатическая нагрузка от падающего камня, определяемая по (1) и равная 945 Н/с; A – приведенная площадь, на которой распределена нагрузка P , при условии выполненной защиты из реголита, м², при среднем угле внутреннего трения реголита в 17,5° [17] составит 0,46 м² (рис. 2); ρ – плотность реголита, принята равной²⁶ 3000 кг/м³; t – толщина слоя реголита, м (рис. 1); g – ускорение свободного падения, на Луне составляет 1,62 Н/кг; $\operatorname{tg} \theta_0$ – тангенс угла наклона плоскости скольжения к вертикали, равный 0,73.

В данной работе толщина реголита принята на основании обзора существующих исследований и равна 500 мм [17; 16]. Следует учесть, что на толщину защитного слоя реголита будут влиять радиационно-физические условия эксплуатации ЯУ и ее теплотехнические характеристики. Кроме того, нужно учитывать снижение прочности вследствие старения кевлара, а также возможное снижение прочности, связанное с «распуханием» (изменением структуры нитей) и температурными метаморфозами, что учтено в снижении конечной прочности нитей на 2/3. Выполнив расчет по (1), получим, что прочность кевлара будет вполне обеспечена от площадной

нагрузки, так как предполагается, что на ткань из кевлара будет приходиться распределенная нагрузка за счет распределения верхним слоем реголита.

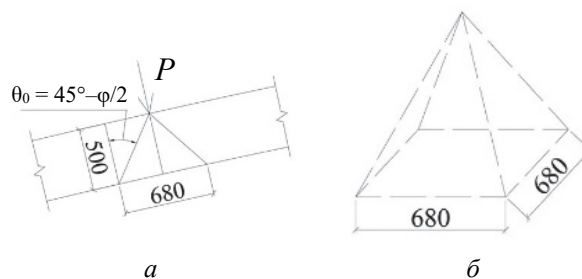


Рис. 2. Схема приложения нагрузки (а):
 P – квазистатическая нагрузка от падающего камня, Н;
 θ_0 – угол наклона плоскости скольжения к вертикали;
 φ – угол внутреннего трения, для реголита равный 17,5°;
 изометрическая проекция распределения нагрузки (б)
 (условно принято приложение нагрузки под углом 90°)
Figure 2. Scheme of the load application (а):
 P – quasi-static load from the falling stone, N;
 θ_0 – angle of inclination of the sliding plane to the vertical;
 φ – angle of internal friction, for regolith equal to 17.5°;
 isometric projection of load distribution (б)
 (the load is conventionally applied at an angle of 90°)

Вероятность падения астероидов массой 30 г составляет 6,14·10⁻¹⁰ шт./((м²·год) или 3,07·10⁻⁹ шт./((м²·ср. экслп.)²⁷, что меньше значения 5·10⁻⁵ событий/год, а следовательно, не требуется предусмотрения дополнительных мероприятий по снижению этих рисков²⁸.

Для строительства рассматриваемой конструкции внешней защиты АЭС на Луне предлагается использование следующих видов строительной техники, которой будут оснащены луноходы: шнек – для покрытия конструкции слоем реголита (заметим, что реголит, несмотря на «рыхлость» обладает высокой связностью частиц, то есть способен налипать частицами друг к другу [20; 22]); буровая установка для закрепления опор конструкций купола в лунном грунте²⁹; роботизированная установка по сборке полуарок и цен-

²⁵ Supercoiling. Эволюция сетчатых конструкций. Spiral technology. 2008. URL: <http://drop-shukhov.blogspot.com/2008/06/> (дата обращения: 28.02.2022).

²⁶ Луна, лунный грунт и химический состав лунных пород. URL: <http://www.ppra.ru/additional/12zem/geographic-shell-7414.php> (дата обращения: 28.02.2022).

²⁷ Сколько метеороидов тяжелее 30 граммов падает на Луну ежегодно? URL: http://stp.cosmos.ru/index.php?id=1137&tx_ttnews%5Btt_news%5D=6174&cHash=7a1e9dc7460e19c8e84cd84073c3d841 (дата обращения: 28.02.2022).

²⁸ Рекомендации по применению принципов и способов противоаварийной защиты в проектах строительства. Методические подходы. М.: Москомархитектура, 2004.

²⁹ Бурение разведочных скважин на луне / Lunar drilling rig. URL: <http://geofpro.com/space-drilling.html> (дата обращения: 28.02.2022).

тральной стойки каркаса на отметке планировки (на фланцевом стыке) [23]; грузоподъемный механизм для установки арок и центральной стойки каркаса в проектное положение; механизм для наматывания нитей кевлара между несущими конструкциями.

Произведем оценку мощности, достаточной для подъема лунного грунта на высотную отметку +8,500 м. Примем операционную неснижаемую мощность на основе аналога, а именно советского «Лунохода-1», в котором вырабатываемая мощность равнялась 150–170 Вт³⁰ и ее хватало на передвижение аппарата и работу систем связи. Нарращивание мощности на рабочие операции предлагается осуществлять дополнительно³¹ за счет радиоизотопных источников энергии [24], эта мощность и будет расходоваться на возведение каркаса и ограждающей конструкции защитного купола. Производительность такой установки для шнекового оборудования может быть приблизительно оценена по формуле

$$N = \frac{\rho g Q H}{\eta}, \quad (3)$$

где N – мощность шнекового насоса, принята равной 300 Вт в первой итерации (на основе сведений о существующем марсоходе Perseverance); ρ – плотность реголита, принята равной³² 3000 кг/м³; g – ускорение свободного падения на Луне, составляет 1,62 м/с²; Q – производительность подачи грунта, м³/ч; H – максимальная высота подачи

грунта, м; η – коэффициент полезного действия установки, принят равным 0,9³³.

Из (2) получаем производительность подачи грунта шнеком, которая составит 23,53 м³/ч (при мощности в 300 Вт). При снижении мощности на каждый 1 Вт производительность будет падать на 0,08 м³/г.

Так как в нормальных условиях предел упругости титановых сплавов близок к кевлару – 1050 МПа³⁴ (однако следует учитывать снижение прочности вследствие старения кевлара, а также возможное снижение прочности, связанное с «распуханием» – изменением структуры нитей и температурными метаморфозами, что учтено в снижении конечной прочности нитей на 2/3), то примем сечение полуарок конструктивно в виде трубы общим диаметром 150 мм, толщиной 5 мм и соединением на фланцевые стыки отдельных элементов. Масса полуарки ориентировочно составит 220 кг (при ее длине в 20,48 м). Требуемая статическая мощность крана в таком случае может быть оценена по формуле

$$P_{ст} = \frac{Q_n V}{10^3 \eta_{тр} k_p}, \quad (4)$$

где Q_n – требуемая грузоподъемность, равная 36,7 кг (вес полуарки в условиях тяготения Луны); V – максимальная скорость подъема, принята равной 0,007 м/с (на основании данных о безопасной скорости движения марсохода Perseverance³⁵); $\eta_{тр}$ – КПД трансмиссии, принят равным 0,985 – как для механической трансмиссии; k_p – коэффициент коррекции, связанный со снятием с двигателя мощности, принимается в интервале от 0,93 до 0,96.

Подставив указанные выше значения в (3), получим значение требуемой мощности для подъема одной полуарки, которое составит 3 Вт.

Основные операции возведения предлагаемой конструкции АЭС приведены на рис. 3.

³⁰ Луноход (космическая программа). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Луноход_\(космическая_программа\)#Управление](https://ru.wikipedia.org/wiki/Луноход_(космическая_программа)#Управление) (дата обращения: 28.02.2022).

³¹ Кэбин Э. Радиоизотопные источники электрической энергии и тепла. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuc_tech/isotopes/index.html (дата обращения 28.02.2022); В России разработали ядерную батарейку на никеле-63, работающую 50 лет. URL: <https://habr.com/ru/news/t/391187/> (дата обращения: 28.02.2022); Сенсация от китайских ученых. Они создают первый луноход с атомным двигателем. URL: https://www.ltv.ru/news/2007-04-17/211519-sensatsiya_ot_kitayskih_uchenyh_oni_sozdayut_pervyy_lunohod_s_atomnym_dvigatелем (дата обращения: 28.02.2022).

³² Луна, лунный грунт и химический состав лунных пород. URL: <http://www.pppa.ru/additional/12zem/geographic-shell-7414.php> (дата обращения: 28.02.2022).

³³ Марсоход Perseverance. URL: <https://www.nasa.gov/perseverance> (дата обращения: 28.02.2022).

³⁴ Прочность титана в сравнении со сталью. URL: <https://varimtutru.com/prochnost-titana-v-sravnении-so-stalyu/> (дата обращения: 28.02.2022).

³⁵ Марсоход Perseverance. URL: <https://www.nasa.gov/perseverance> (дата обращения: 28.02.2022).

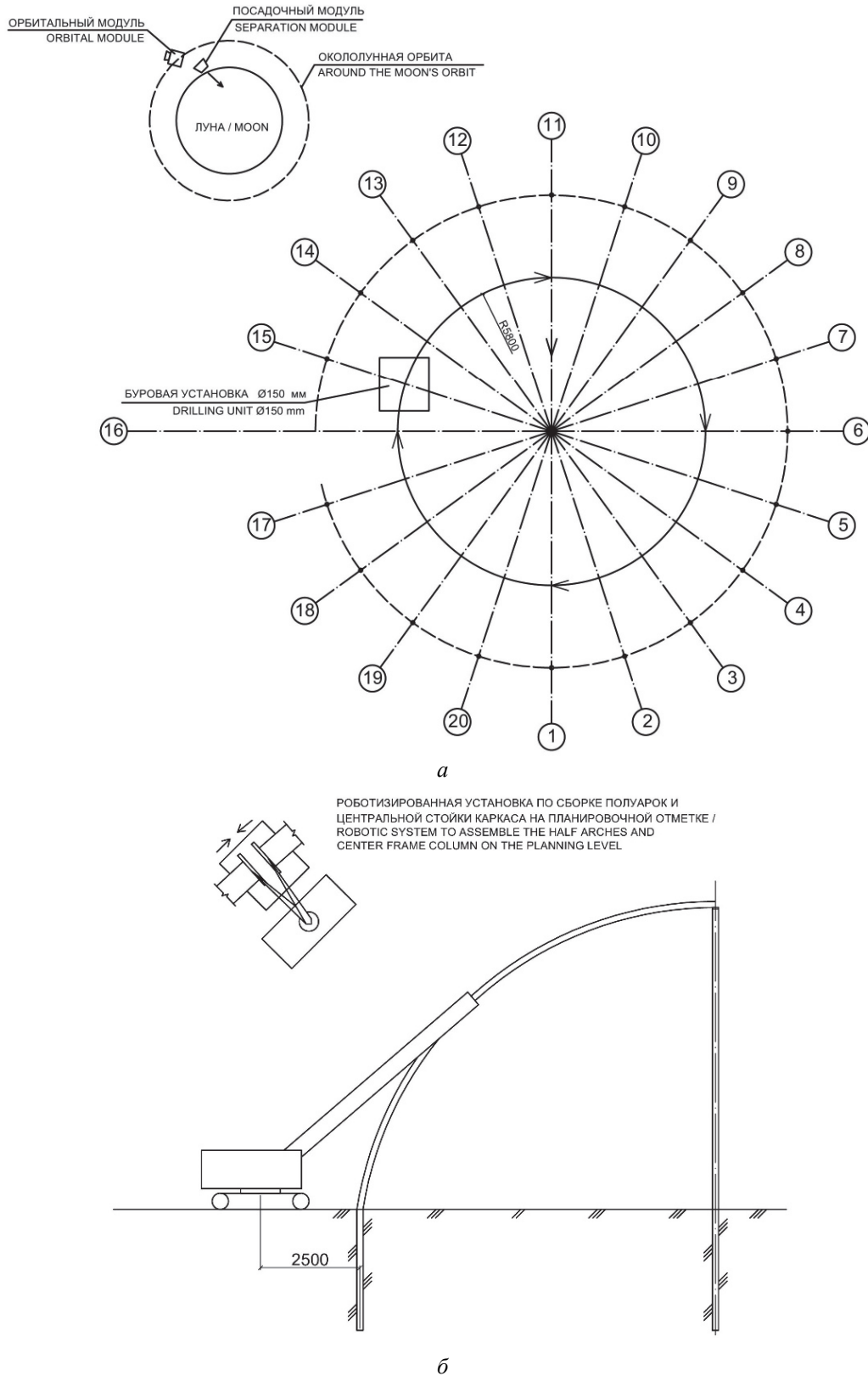


Рис. 3. Основные операции при возведении АЭС:

а – бурение скважин; б – сборка элементов каркаса и установка каркаса в проектное положение

Figure 3. The main operations during the construction of the nuclear power plant:

a – drilling wells; б – assembling the elements of the framework and installation of the framework in the designed position

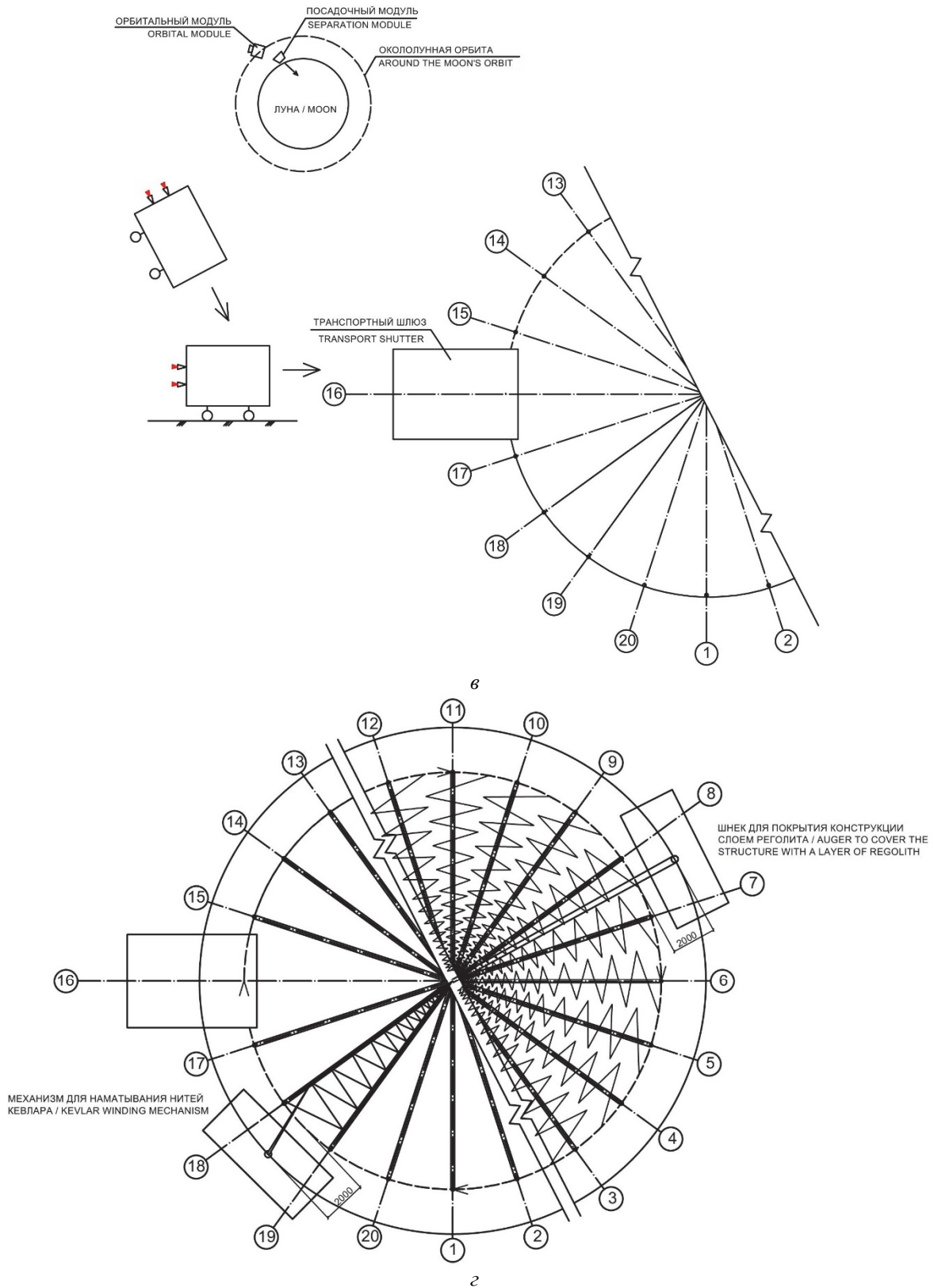


Рис. 3. Основные операции при возведении АЭС (продолжение):
 в – установка транспортного шлюза; г – навивка нитей кевлара и покрытие конструкции реголитом
Figure 3. The main operations during the construction of the nuclear power plant (continuation):
 в – installation of the transport airlock; г – winding the strands of kevlar and covering the structure with regolith

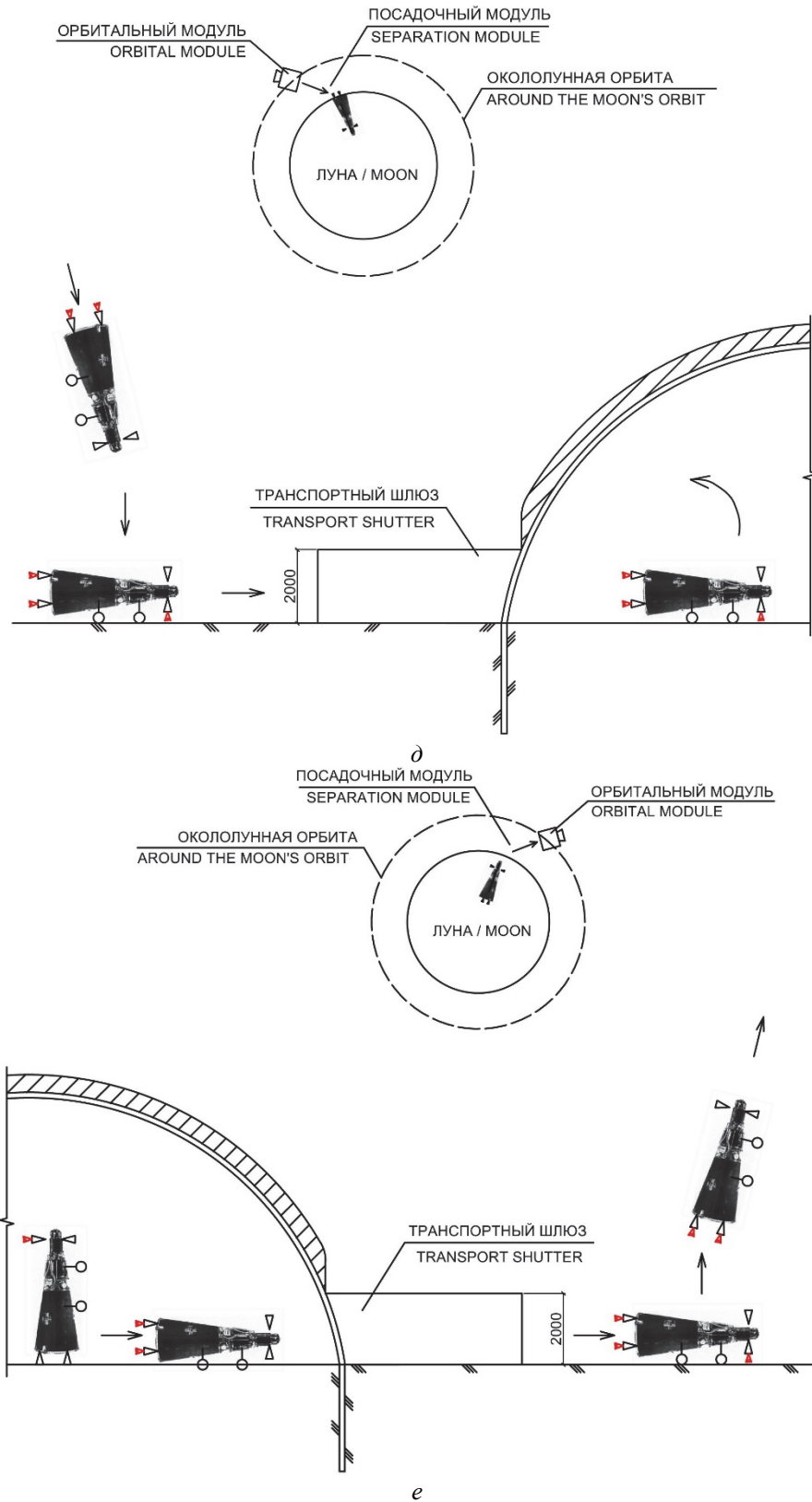


Рис. 3. Основные операции при возведении АЭС (окончание):
 δ – установка модулей в группу; e – утилизация модулей
Figure 3. The main operations during the construction of the nuclear power plant (ending):
 δ – installation of modules in the group; e – disposal of modules

3. Обсуждение

На основании выполненного анализа наиболее перспективной из существующих на данный момент ядерных установок для использования в условиях Луны как стационарной АЭС являются установки с реакторами на быстрых нейтронах, использующими газы в качестве теплоносителей (например, «Ромашка», SAFE-400 и т. д.). В качестве преобразователей электрической энергии эффективны термоэлектрические генераторы, так как они основаны на прямом преобразовании тепловой энергии в электрическую посредством полупроводниковых элементов или двигателей Стирлинга. Поскольку рассмотренные установки обладают малой единичной мощностью относительно требований экономической целесообразности (определенных NASA) и отсутствует информация о надежности их работы в условиях падения метеоритов и космических камней, предполагается групповое размещение установок. Технология получения электрической энергии с использованием термоэлектрических генераторов (или двигателей Стирлинга) позволяет осуществить такое групповое размещение с реализацией единой внешней защиты от падения метеоритов, космических камней, а также радиационной защиты от амплитудных возмущений в космическом пространстве, что гарантирует работоспособность и надежность работы АЭС в условиях Луны.

Изученные реакторные установки при работе в группе в космическом пространстве (в условиях Луны) требуют защиты от падения космических тел в течение срока эксплуатации только в виде космических камней, вероятность попадания их в пятно расположения сооружения превышает допустимую, согласно «Рекомендациям по применению принципов и способов противоваварийной защиты в проектах строительства»³⁶. Защита может быть организована за счет использования комбинированной ограждающей конструкции с применением кевларовой ткани, которая обладает необходимой прочностью при динамических воздействиях (что также подтверждается в [17]), и местного грунта – реголита. Анализ существующих исследований, посвященных архитектурно-строительным решениям ста-

ционарных комплексов на Луне и Марсе [16; 17], показал, что защита внутреннего пространства от амплитудных колебаний радиоактивного излучения и температуры также может быть организована с применением реголита. Он обладает необходимыми характеристиками для частичного радиационного сжигания остаточного тепловыделения при выработке энергии за счет свойств поглощения [20], позволяет некоторым образом рассредоточить нагрузку от падающих космических камней, а жесткий каркас, выполненный в титане (в отличие от «наддувных» систем [16; 17]), способен обеспечить постоянный объем внутреннего пространства и равноудаленность установок друг от друга при внешних воздействиях.

Заключение

Оценка концепта защитной конструкции АЭС на Луне показывает, что реакторные установки можно утилизировать на соответствующую орбиту по завершении срока эксплуатации без использования сложной технологии их переработки за счет наличия транспортного модуля и самой конструкции технического устройства установки, при этом защитная оболочка в виде ограждающей конструкции допустимо использовать еще раз. При ее строительстве не требуется значительной мощности и особого вида оборудования, а в качестве основных источников может быть использована энергия радиационных изотопов.

В качестве дальнейших исследований предлагается произвести проверку радиационного теплопоглощения реголита путем математического моделирования при известных свойствах; определить толщину, необходимую для снижения амплитуды радиационного воздействия; рассмотреть иные технические возможности нанесения реголита на поверхность купола, в том числе 3D-печать; учесть старение и потерю свойств кевлара при действии температурных колебаний и космической радиации; подробно проанализировать работу и долговечность несущих конструкций купола в условиях температурного воздействия, низких гравитационных сил, влияния падающих рядом космических тел путем математического моделирования методом конечного элемента.

³⁶ Рекомендации по применению принципов и способов противоваварийной защиты в проектах строительства. Методические подходы. М.: Москомархитектура, 2004.

Список литературы / References

1. Sherwood B. Principles for a practical Moon base. *Acta Astronautica*. 2019;160:116–124. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.04.018>
2. Ponomarev-Stepnoi NN. Nuclear power engineering in space. *Atomic Energy*. 1989;66(6):371–373. (In Russ.)
Пономарев-Степной Н.Н. Ядерная энергетика в космосе // Атомная энергия. 1989. Т. 66. Вып. 6. С. 371–373.
3. Bennett GL. Introduction to space nuclear power and propulsion. In: Greenspan E. (ed.) *Encyclopedia of Nuclear Energy*. Elsevier; 2021. p. 155–167. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819725-7.00133-1>
4. Fribourg Ch, Roux JP. Nuclear power generation for planetary exploration why not a pwr? *Acta Astronautica*. 2000;47(2–9):91–95. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(00\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(00)00047-3)
5. Taylor GJ. Lunar science: using the Moon as a test-bed // *Lunar and Planetary Instruments, Workshop on Advanced Technologies for Planetary Instruments. Part 1. Lunar and planetary Exploration*. 1993, January 1. Available from: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930019632> (accessed: 15.03.2022).
6. Sherwood B. Principles for a practical Moon base. *Acta Astronautica*. 2019;160:116–124. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.04.018>
7. Zubrin R. The Moon – Mars Initiative: making the vision real. *Futures*. 2009;41(8):541–546. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2009.04.018>
8. Rosen R, Schnyer AD. Civilian uses of nuclear reactors in space. *Science & Global Security*. 1989;1:147–164
9. Meloy TP, Williams MC. The Moon then Mars. *Minerals Engineering*. 2002;15(3):115–121. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00009-2)
10. Murray WS, Antonellis R. China’s Space Program: the dragon eyes the Moon (and Us). *Orbis*. 2003;47:4645–4652. [https://doi.org/10.1016/S0030-4387\(03\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S0030-4387(03)00084-X)
11. Nguyen T. Powering human settlements in space. *ACS Central Science*. 2020;6(4):450–452. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.0c00382>
12. Kukharkin NE, Ponomarev-Stepnoy NN, Usov VA. *Space nuclear power engineering (nuclear reactors with thermoelectric and thermal emission conversion – “Romashka” and “Yenisei”)*. 2nd ed., suppl. Moscow: Izdat Publ.; 2012. (In Russ.)
Кухаркин Н.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Усов В.А. Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием – «Ромашка» и «Енисей»). 2-е изд., доп. М.: ИздАТ, 2012. 226 с.
13. Bogush IP, Gryaznov GM, Zhabotinsky EE, Markarov AN, Serbin VI, Trukhanov YuL. Space thermal emission nuclear power unit under “Topaz” program: design principles and operation conditions. *Atomic Energy*. 1991;70(4):211–213. (In Russ.)
Богуш И.П., Грязнов Г.М., Жаботинский Е.Е., Маркаров А.Н., Сербин В.И., Труханов Ю.Л. Космическая термоэмиссионная ЯЭУ по программе «Топаз»: принципы конструкции и режимы работы // Атомная энергия. 1991. Т. 70. Вып. 4. С. 211–213.
14. Poston DI, Kapernick RJ, Guffee RM. Design and analysis of the SAFE-400 space fission reactor. *AIP Conference Proceedings*. 2002;608:578–588. <https://doi.org/10.1063/1.1449775>
15. Dalcher AW, Sutherland JD. Design of the SNAP 10A reactor. *SAE World Congress & Exhibition Technical Paper*. 1964. <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/640218>
16. Medvedev Yu. “Topaz-2” will be tested in space. The Americans. *Tekhnika Molodezhi*. 1993;(5):2–3. (In Russ.)
Медведев Ю. «Топаз-2» испытуют в космосе. Американцы // Техника – молодежи. 1993. № 5. С. 2–3.
17. Zagoruyko AA. Design features of space stations for lunar and Mars exploration. *Science. Education and Experimental Design*. 2020;(1):451–454. (In Russ.)
Загоруйко А.А. Конструктивные особенности космических станций освоения Луны и Марса // Наука, образование и экспериментальное проектирование. 2020. № 1. С. 451–454.
18. Tarasevsky FG. Application of regolith for base construction on the Moon. *Young Scientist*. 2016;(29(133)): 158–161. (In Russ.)
Тарасевский Ф.Г. Применение реголита при возведении базы на Луне // Молодой ученый. 2016. № 29 (133). С. 158–161.
19. Tripathi RK, Wilson JW, Badavi FF, De Angelis G. A characterization of the moon radiation environment for radiation analysis. *Advances in Space Research*. 2006; 37(9):1749–1758. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006>
20. Naito M, Hasebe N, Shikishima M, Amano Y, Haruyama J, Matias-Lopes JA, Kim KJ, Kodaira S. Radiation dose and its protection in the Moon from galactic cosmic rays and solar energetic particles: at the lunar surface and in a lava tube. *Journal of Radiological Protection*. 2020; 40(4):947–961. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/abb120>
21. Sluta E. Physical and mechanical properties of the lunar soil (review). *Astronomical Bulletin*. 2014;48(5): 358–382.
Слута Е. Физико-механические свойства лунного грунта (обзор) // Астрономический вестник. 2014. Т. 48. № 5. С. 358–382.
22. Hayne PO, Bandfield JL, Siegler MA, Vasavada AR, Ghenet RR, Williams J-P, Greenhagen BT, Aharonson O, Elder CM, Lucey PG, Paige DA. Global regolith thermo-

physical properties of the Moon from the diviner lunar radiometer experiment. *JGR: Planets*. 2017;122(12): 2371–2400. <https://doi.org/10.1002/2017JE005387>

23. Ellery A. Sustainable in-situ resource utilization on the moon. *Planetary and Space Science*. 2020;184: 104870. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2020.104870>

24. Heinicke Ch, Adeli S, Baqué M, Correale G, Fateri M, Jaret S, Kopacz N, Ormö J, Poulet L, Verseux C. Equipping an extraterrestrial laboratory: overview of open research questions and recommended instrum. *Advances in Space Research*. 2021;68(6):2565–2599. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.047>

Сведения об авторах

Белов Вячеслав Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6246-6100, Scopus Author ID: 57218418373, eLIBRARY SPIN-код: 6936-1160; boks-obn@list.ru

Сазонова Светлана Андреевна, студент, кафедра строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0003-4025-2053; s.sazonovaa17@mail.ru

About the authors

Vyacheslav V. Belov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Industry Facilities, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6246-6100, Scopus Author ID: 57218418373, eLIBRARY SPIN-code: 6936-1160; boks-obn@list.ru

Svetlana A. Sazonova, student, Department of Construction of Thermal and Atomic Power Industry Facilities, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4025-2053; s.sazonovaa17@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-140-145
UDC 621.78.01:621.785-97


Research article / Научная статья

The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in carbon hypoeutectoid steels

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: January 25, 2022

Revised: April 17, 2022

Accepted: April 22, 2022

Keywords:

magnetic properties, coercive force, temper colors, cooling in calm air, temperature interval

Abstract. Hypoeutectoid steel with 0,25% carbon without preliminary heat treatment was investigated. The article describes an experimental study of the hardness and coercive force of this steel during heating and subsequent cooling in calm air. The magnetization depth of the device used and the penetration depth of the indenter when measuring hardness are significantly greater than the thickness of the total oxide films, therefore the measurement result is a complex value depending on the properties of the base metal and oxides. The influence on the studied parameters is proved not only of the structure of the base metal, but also of the properties of oxide films that appear on the steel surface in an oxygen-containing medium during heating. As a result, hardness and coercive force do not correlate with each other at all temperature intervals of heating. It is shown that the visual assessment of temperature by temper colors is subjective, and when the temperature threshold exceeds 500°C (for the research steel in given modes), the visually determined dependence between the temperature and the color of the sample surface after temperature exposure disappears.

For citation


Kornilova AV, Kyaw Zaya. The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in carbon hypoeutectoid steels. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):140–145. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-140-145>

Влияние температуры нагрева на изменение коэрцитивной силы и твердости углеродистых доэвтектоидных сталей

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: 25 января 2022 г.

Доработана: 17 апреля 2022 г.

Принята к публикации: 22 апреля 2022 г.

Аннотация. Исследована доэвтектоидная сталь с содержанием углерода 0,25 % без предварительной термической обработки. Описано экспериментальное исследование твердости и коэрцитивной силы при нагреве и последующем охлаждении на спокойном воздухе. Глубина

© Kornilova A.V., Kyaw Zaya, 2022

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

Ключевые слова:

магнитные свойства, коэрцитивная сила, цвета побежалости, охлаждение на спокойном воздухе, температурный интервал

намагничивания используемого прибора и глубина проникновения индентора при измерении твердости значительно больше толщины суммарных оксидных пленок, поэтому результат измерения представляет собой комплексную величину, зависящую от свойств основного металла и оксидов. Доказано влияние на исследуемые параметры не только структуры основного металла, но и свойств оксидных пленок, возникающих на поверхности стали в кислородсодержащей среде при нагреве. В результате твердость и коэрцитивная сила не коррелируют друг с другом во всех температурных интервалах нагрева. Показано, что визуальная оценка температуры по цветам побежалости носит субъективный характер и при превышении температурного порога в 500 °С (для исследуемой стали на заданных режимах) визуальное определяемая зависимость между температурой и цветом поверхности образца после температурного воздействия исчезает.

Для цитирования

Kornilova A.V., Zhaoy Zaya. The influence of heating temperature on coercive force and hardness changes in carbon hypoeutectoid steels // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 140–145. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-140-145>

Introduction

When a temperature load is applied and subsequent cooling occurs in metals and alloys, two synergistically affecting each other processes take place simultaneously – a change in the structure and properties of the base metal and the appearance of oxide films on the surface. During the oxidation, the following iron oxides are formed: FeO (wustite), Fe₃O₄ (magnetite) and Fe₂O₃ (hematite). Oxides are arranged in layers according to the decrease in oxygen content from the outer to the inner layer (Figure 1).

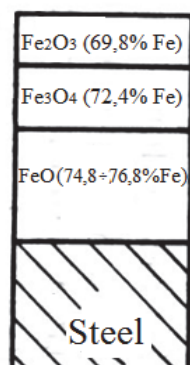


Figure 1. Simplified scheme of oxide films on the surface of carbon steel during heating in an oxygen-containing environment

Wustite (FeO) has face-centered cubic (FCC) and stable at temperatures above 570 °C. Below this temperature, it decomposes. The largest amount of wustite is formed in the temperature interval 700–900 °C. Wustite is the softest and loosest layer of the oxide film. Magnetite (Fe₃O₄) has a cubic

crystal lattice, highly abrasiveness and is insoluble in acids. Hematite (Fe₂O₃) has the highest abrasiveness and practically does not dissolve in acids [1]. With a metal hardness according to Vickers of 140 units, the hardness of FeO is 270–350, Fe₃O₄ 420–500, Fe₂O₃ 1030 units.

In mechanical engineering, the study of processes that occur during heating and cooling of steel, as an alloy of iron with carbon and other elements, is typically limited to the study and optimization of the base metal's structure. The composition, thickness, and properties of oxide films are dealt with either by specialists in hot rolling [2–5], where scale (a high-temperature oxide film on the surface of steel) is defective, or by specialists in processing scale and restoring iron from it¹ [6–8].

Therefore, the purpose of this research is to determine the effect of temperature loading on the hardness and magnetic properties of hypoeutectoid steel, which depend both on the processes occurring in the base metal and on the properties of surface oxide films.

1. Methods and materials

The work is experimental. For the experiment, cylindrical samples made of carbon steel 25 (carbon content from 0.25–0.33%) were used. The critical points of the researched steel are Ac₁ = 735 °C,

¹ Degai AS, Zuev MV, Zasukhin AL, Karmanov OB, Mikurova MI, Orekhov OE, Gusev RV. *Method of preparation of oiled scale for processing*. RU2279491C2. 10.07.2006. (In Russ.)

$A_{c3} = 835 \text{ }^{\circ}\text{C}$. To study the coercive force (H_c , A/m), a verified and certified structuroscope (coercimeter) KIM-2M was used. Figure 2 shows a sample and nozzles for measuring coercive force. For hardness, the Rockwell method B scale (HRB, dimension – arbitrary units) was chosen, implemented in a stationary hardness tester TK-14-250. The samples were heated in a laboratory furnace with a PM-16M-V thermostat. The experiment was carried out as follows: the samples were placed in a furnace heated to a given temperature, held for 15 minutes, and cooled in calm air. The temperature ranged from 200 to 1000 $^{\circ}\text{C}$. In each sample, before heating and after cooling, the hardness and coercive force were measured several times along the length of the sample, and then the values were averaged. Before heating, for all samples – the average value of hardness is 89 units of the Rockwell B scale, the average value of the coercive force is 1023 A/m.



Figure 2. Sample and nozzles for measuring coercive force

2. Results and discussion

On Figure 3, numbers from 1 to 9 show the heating temperatures of the samples under study, plotted on the steel corner of the Fe–Fe₃C diagram. Samples 1–6 were heated to temperatures below the critical point A_{c1} , sample 7 – between A_{c1} and A_{c3} , samples 8 and 9 were completely austenitized during heating. All samples, except the first, were heated above the Curie point of cementite (210 $^{\circ}\text{C}$). Research the behavior of the coercive force during thermal cycling near the Curie point of cementite (210 $^{\circ}\text{C}$) is the subject of works [9–13]. However, the study of the complex influence of processes in the base metal and in the zone of formation of oxide films on engineering characteristics – hardness and magnetic properties during single heating has not been carried out.

Figures 4 and 5 are show graphical dependences of the experimental results. Numbers 1–9 correspond to the temperatures of the experiment in Figure 3.

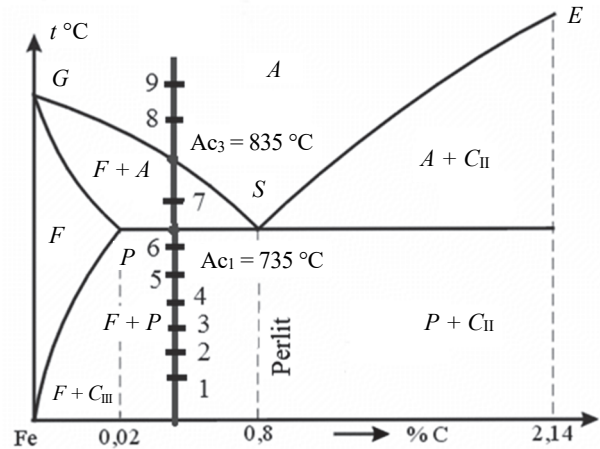


Figure 3. The steel angle of the Fe–Fe₃C diagram, with points (1–9) corresponding to experiment temperatures

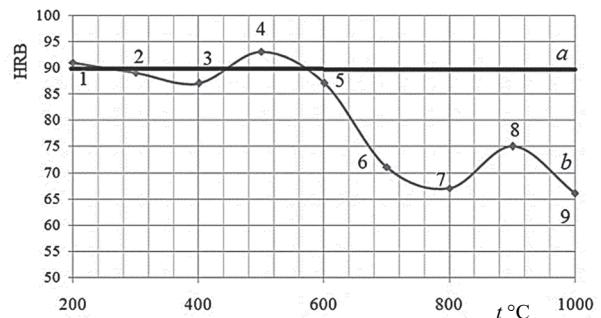


Figure 4. Dependence of the change in hardness after heating and cooling on the heating temperature: a – average hardness before heating; b – after heating and cooling

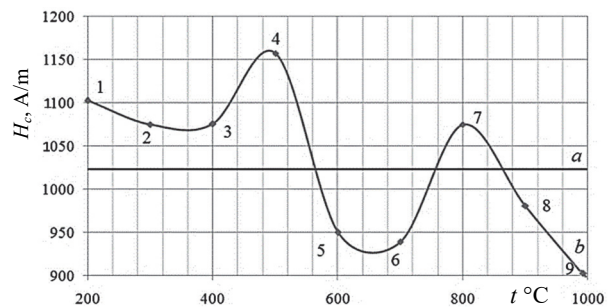


Figure 5. Dependence of the change in the coercive force after heating and cooling on the heating temperature: a – the average value of the coercive force before heating; b – after heating and cooling

Figure 6 shows the temper colors of the samples after heating and cooling. Sample 0 is one of the samples at the same experimental series, not participating in the experiment. Obviously, the visual assessment of temperature by temper colors is subjective, when the temperature threshold of 500 $^{\circ}\text{C}$ is exceeded (in this work), the visually determined dependence between the temperature and the color

of the sample surface after exposure to temperature disappears.

In this experiment, both the coercive force and hardness were determined taking into account the properties of the base metal and surface oxide films. The depth of magnetization of the device used and the depth of penetration of the indenter when measuring hardness are significantly greater than the thickness of the total oxide films, therefore, the measurement result is a complex value depending on the properties of the base metal and oxides. Description of the processes occurring in steel during experimental studies is given in Table.

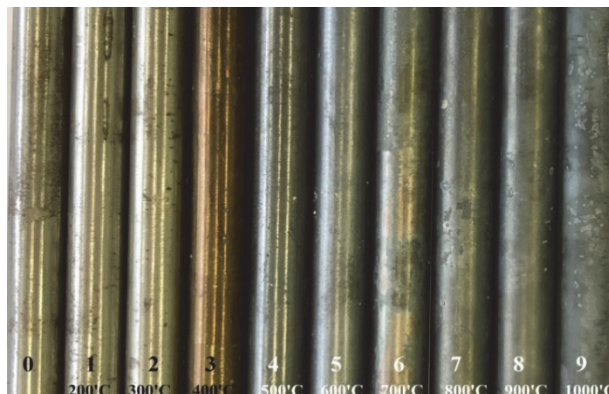


Figure 6. Temper colors of samples after heating and cooling

Description of the occurring processes in the research samples during heating and cooling

Temperature interval	Reaction of hardness and coercive force	Steel changes
200–300 °C	Slight drop from unloaded temperature state	Residual stresses decrease in the base metal, a thin single-layer oxide film appears on the surface
300–400 °C	Hardness reduction continues. Coercive force decreases slightly	Deformed crystal lattice begins to align in the base metal; hematite predominates in the structure of surface oxides (sample 3, Figure 6)
400–500 °C	Increased hardness and coercive force	There is a similarity of incomplete annealing in the structure of the base metal, but the thickness of a particularly hard layer (hematite) increases on the surface
500–600 °C 600–700 °C	Hardness drop. Avalanche-like drop in coercive force due to the appearance of non-ferromagnetic elements in the structure of surface oxide films	Incomplete annealing of the base metal occurs, loose wustite predominates in the structure of the surface layers (appeared at a temperature of 570 °C)
700–800 °C	Hardness drop. Growth of the coercive force due to the predominance of the wustite ferromagnetic component in the oxide structure, the phenomenon of scale detachment from the base metal	The transition during heating to the GSF region of the Fe–Fe ₃ C diagram (Figure 2), an increase in the thickness of oxide films on the surface
800–900 °C	Hardness increase. Sharp drop in coercive force	Complete austenization of the base metal, hardening takes place in it due to a process of similar normalization, partial removal of oxides from the surface occurs
900–1000 °C	Sharp drop in hardness and coercive force	There is an overheating of the base metal, uncontrolled growth of austenite grains, self-removal of scale from the surface (Figure 7)

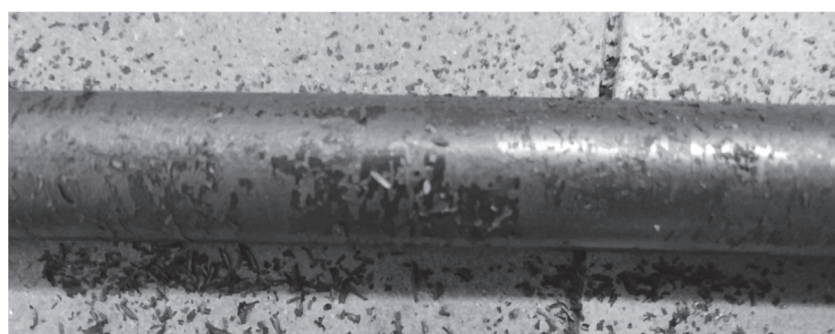


Figure 7. High temperature scale on the sample surface

Conclusion

When applying a temperature load and subsequent cooling in carbon steel, two synergistically influencing processes occur simultaneously – a change

in the structure and properties of the base metal and the appearance of oxide films on the surface. Hardness and coercive force (the most structurally sensitive magnetic characteristic of a ferromagnet) are not correlated with each other at all temperature intervals of heating.

It is obvious that the visual assessment of temperature by temper colors is subjective, when the temperature threshold of 500 °C is exceeded (for the research steel in given modes); the visually determined dependence between the temperature and the color of the sample surface after temperature exposure disappears. Therefore, recommendations for determining the temperature of the fire effect on metal structures by the temper colors of steel structures (for example, after a fire) cannot be recognized as sufficiently reliable.

References

1. Panchenko VS, Merezhinskaya EV, Kardailskaya EV, Gera DN. Study of etchability of steel scale in hydrochloric acid. *Steel*. 2013;10:42–44. (In Russ.)
2. Garber EA, Gatiyatullin DZ. Factors that cause residual scale surface defects in hot-rolled wide strips and methods of their elimination. *Mechanical Equipment of Metallurgical Plants*. 2017;(2(9)):18–21. (In Russ.)
3. Pokachalov VV. Phase composition of scale and defects arising during wire drawing. *Hardware*. 2006; (3(13)):30–33. (In Russ.)
4. Sychkov AB, Kopceva NV, Efimova YY, Zhloba AV, Kamalova GY. Identification of the surface defects of sheet “Rolled scale.” *Modeling and Development of Metal Forming Processes*. 2018;(24):12–18. (In Russ.)
5. Merkulov AA, Efimov SA, Korolev AV. Mathematical modeling of the process of rotary cleaning of rolled metal from scale. *Mathematical Methods in Engineering and Technologies – MMET*. 2014;(5(64)):133–137. (In Russ.)
6. Druz ON, NikitinYuN. Improvement of technology for processing scale into powder material. *Resource Saving Technologies for Production and Pressure Shaping of Materials in Machine-Building*. 2020;(4(33)):28–39. (In Russ.)
7. Kortz T, Wulfert H. Cost-effective process of processing and use of oil-containing rolling scale. *Ferrous Metals*. 2012;(2):25–30. (In Russ.)
8. Lipatkina TN. Receiving an iron-rich product from scale. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy)*. 2016;(1(82)):72–75. (In Russ.)
9. Kornilova AV, Idarmachev IM, Zayar C, Paing T. A method of determination of the service life of a die tool with application of magnetic methods of nondestructive control and diagnostics. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2014;43(5):439–444. <https://doi.org/10.3103/S1052618814050082>
10. Zaya K, Paing T, Kornilova AV. The effects of operational thermal cycling on mechanical and magnetic properties of structural steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;675(1):012041. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012041>

11. Kornilova AV, Toptygin KP, Krasnovskii AN, Zaya K. Features of the destruction of tool steels in technical processes in aerospace industry. *Advances in the Astronautical Sciences. 2nd IAA/AAS Conference on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials, SciTech Forum 2019*. Moscow; 2021. p. 689–702.

12. Kornilova AV, Nabiullina LK, Paing T, Zayar K, Selishchev AI. Study of damage stamps for hot forging magnetic methods. *Vestnik MSTU “STANKIN.”* 2014; (2(29)):40–43. (In Russ.)

13. Kornilova AV, Idarmachev IM, Paing T, Zayar K. Some practical aspects of the application of magnetic methods of non-destructive testing and diagnostics. *Occupational Safety in Industry*. 2014;(3):50–53. (In Russ.)

Список литературы

1. Панченко В.С., Мержинская Е.В., Кардаильская Е.В., Згера Д.Н. Повышение температуры воздуха горения в методических печах // *Сталь*. 2013. № 10. С. 42–44.
2. Гарбер Э.А., Гатиятуллин Д.З. Причины образования на поверхности горячекатаных стальных широких полос дефекта «остаточная окалина» и методы его устранения // *Механическое оборудование металлургических заводов*. 2017. № 2(9). С. 18–21.
3. Покачалов В.В. Фазовый состав окалины и дефекты, возникающие при волочении проволоки // *Метизы*. 2006. № 3 (13). С. 30–33.
4. Сычков А.Б., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Жлоба А.В., Камалова Г.Я. Идентификация дефекта поверхности листового проката типа «Вкатанная окалина» // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением*. 2018. № 24. С. 12–18.
5. Меркулов А.А., Ефимов С.А., Королев А.В. Математическое моделирование процесса роторной очистки металлического проката от окалины // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ*. 2014. № 5 (64). С. 133–137.
6. Друзь О.Н., Никитин Ю.Н. Совершенствование технологии переработки окалины в порошок материал // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. 2020. № 4 (33). С. 28–39.
7. Корц Т., Вульферт Х. Экономически эффективный процесс переработки и использования масло-содержащей прокатной окалины // *Черные металлы*. 2012. № 2. С. 25–30.
8. Липаткина Т.Н. Получение металлизированного продукта из окалины // *Литье и металлургия*. 2016. № 1(82). С. 72–75.
9. Kornilova A.V., Idarmachev I.M., Zayar C., Paing T. A method of determination of the service life of a die tool with application of magnetic methods of non-destructive control and diagnostics // *Journal of Machine-*

ry Manufacture and Reliability. 2014. Vol. 43. No 5. Pp. 439–444. <https://doi.org/10.3103/S1052618814050082>

10. Zaya K., Paing T., Kornilova A.V. The effects of operational thermal cycling on mechanical and magnetic properties of structural steels // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 675. No 1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012041>

11. Kornilova A.V., Toptygin K.P., Krasnovskii A.N., Zaya K. Features of the destruction of tool steels in technical processes in aerospace industry // Advances in the Astronautical Sciences. 2nd IAA/AAS Conference on

Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials, SciTech Forum 2019. Moscow, 2021. Pp. 689–702.

12. Корнилова А.В., Набиуллина Л.К., Тем П., Чжо З., Селищев А.И. Исследование магнитными методами повреждаемости штампов для горячей объемной штамповки // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2014. № 2 (29). С. 40–43.

13. Корнилова А.В., Идармачев И.М., Паинг Т., Зяяр Чжо. Некоторые практические аспекты применения магнитных методов неразрушающего контроля и диагностики // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 3. С. 50–53.

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; anna44@yandex.ru

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

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 Author ID: 7004499009, Researcher ID: U-3353-2017, eLIBRARY SPIN-код: 6569-6240; anna44@yandex.ru

Чжо Зяяр, аспирант, кафедра композиционных материалов, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский пер., д. 1; ORCID: 0000-0003-0131-1399, Scopus Author ID: 56416430100; k.kyawzaya@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-146-154
УДК 621.43.03

Научная статья / Research article

Оценка технического состояния электромагнитных форсунок на стенде по погрешности измерения расхода тестовой жидкости

А.А. Ходяков , С.В. Хлопков ✉, В.В. Басова , О.И. Телков , А.Д. Космачева

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

История статьи

Поступила в редакцию: 11 января 2022 г.
Доработана: 20 марта 2022 г.
Принята к публикации: 4 апреля 2022 г.

Ключевые слова:

электромагнитные форсунки, пробег, отклонение расхода тестовой жидкости, критерий Фишера, ошибка аппроксимации, регрессия, коэффициент детерминации

Аннотация. Установлено, что средние значения погрешности измерения расхода тестовой жидкости (ТЖ) электромагнитными форсунками (ЭМФ) связаны с пробегом автомобиля. Чем больше пробег, тем выше значение погрешности. Показано, что зависимость погрешности измерения расхода от пробега может быть описана в грубом приближении регрессией. Техническое состояние ЭМФ оценено прибором для очистки и анализа топливных форсунок HP-6B в комплекте с ультразвуковой ванной Ultrasonic Cleaner. Объекты исследования – ЭМФ бензиновых двигателей с распределенным впрыском топлива. Форсунки эксплуатировались в силовых агрегатах автомобилей ГАЗ-27040 V («Газель»), ZAZ Chance SX, ВАЗ 2121 («Нива»), Chevrolet Lacetti и др. Испытания проведены на 19 комплектах форсунок (в каждом комплекте по 4 форсунки), снятых с двигателей автомобилей с пробегом от 0 до 188 тыс. км. Испытаны форсунки Siemens DEKA ZMZ 6354, Siemens DEKA VAZ 6238, Siemens DEKA VAZ 20734, Siemens DEKA VAZ 20735, Bosch 0 280 158 502, Bosch 0 280 158 017, Bosch 0 280 158 022, Bosch 0 280 150 996, Denso 23209-39145.

Для цитирования

Ходяков А.А., Хлопков С.В., Басова В.В., Телков О.И., Космачева А.Д. Оценка технического состояния электромагнитных форсунок на стенде по погрешности измерения расхода тестовой жидкости // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 146–154. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-146-154>

Evaluation of the technical condition of electromagnetic injectors on the test bench according to the error in measuring the flow rate of the test liquid

Aleksandr A. Khodyakov , Sergey V. Khlopkov ✉, Vlada V. Basova ,
Oleg I. Telkov , Anastasia D. Kosmacheva

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

Article history

Received: January 11, 2022
Revised: March 20, 2022
Accepted: April 4, 2022

Abstract. It has been established that the average values of the error in measuring the flow rate of the test liquid (TL) by electromagnetic injectors (EMI) are associated with the vehicle mileage. The greater the mileage, the higher the value of the error. It is shown that the dependence of the error

Keywords:

electromagnetic injectors, mileage, average measurement errors of the test liquid flow rate, Fisher's criterion, average relative approximation error, regression, coefficient of determination

in measuring the flow rate on the run can be described in a rough approximation by regression. The technical condition of the EMI was assessed by an instrument for cleaning and analyzing fuel injectors HP-6V, complete with an Ultrasonic Cleaner ultrasonic bath. The objects of study are the EMI of gasoline engines with distributed fuel injection. The injectors were used in the power units of GAZ-27040 V ("Gazelle"), ZAZ Chance SX, VAZ 2121 ("Niva"), Chevrolet Lacetti and others, mileage from 0 to 188 thousand km. Siemens DEKA ZMZ 6354, Siemens DEKA VAZ 6238, Siemens DEKA VAZ 20734, Siemens DEKA VAZ 20735, Bosch 0 280 158 502, Bosch 0 280 158 017, Bosch 0 280 158 022, Bosch 0 280 150 9925, Denso 23925 injectors tested.

For citation

Khodyakov AA, Khlopov SV, Basova VV, Telkov OI, Kosmacheva AD. Evaluation of the technical condition of electromagnetic injectors on the test bench according to the error in measuring the flow rate of the test liquid. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):146–154. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-146-154>

Введение

Известно, что техническое состояние (ТС) электромагнитных форсунок (ЭМФ) оказывает влияние на работу бензинового двигателя [1–9]. 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]. Поэтому своевременная диагностика нарушений исправного состояния ЭМФ является задачей, решение которой позволит судить как об остаточном ресурсе, так и о периодичности проведения мероприятий, связанных с восстановлением работоспособности устройства. По рекомендации производителей замену форсунок, независимо от технического состояния механизма, осуществляют на пробеге 100–120 тыс. км. Средняя наработка на отказ может составлять и 125,8 тыс. км [10].

К неисправностям ЭМФ как устройства впрыска топлива относятся межвитковое замыкание обмотки соленоида, снижение жесткости пружины иглы запорного клапана, зависание иглы клапана в крайних верхнем или нижнем положениях [9]. Причинами, оказывающими влияние на работоспособность форсунок, могут быть образующиеся (в результате теплового воздействия) из углеводородов и смол нерастворимые в бензине поверхностные отложения [1–8]. К мероприятиям по установлению нарушений исправного состояния впрыска относятся проверка отсутствия механического повреждения форсунок и наличия соответствующего сигнала, поступающего от электронного блока управления, измерение сопротив-

ления обмотки каждой форсунки, диагностика баланса форсунок¹ [4]. Оценку технического состояния топливных форсунок проводят также и с использованием тестовых жидкостей на стендах. Поверяется герметичность клапана устройства, форма распыла факела тестовой жидкости, поступающей из форсунки, качество распыла жидкости, производительность форсунок² [4].

Пробег автомобилей и сроки эксплуатации ЭМФ не являются определяющими факторами для принятия решения о необходимости проведения процедур очистки форсунок. Техническое состояние устройства зависит не только от образования твердых углеродистых отложений в инжекторе, но и связано со сбоями в электронной системе управления двигателем, с засорением системы питания продуктами, возникающими при использовании низкокачественного бензина³ [1–8; 11]. Поэтому необходимость проведения процессов очистки инжекторов (или их замены) оценивают по представленным ранее проявлениям нарушений технического состояния ЭМФ. Диагностическими параметрами для выявления нарушений технического состояния форсунок, являющимися одновременно и факторами, по которым судят о применимости процедур очистки и замены инжекторов, могут быть баланс форсунок, время срабатывания электромагнита инжектора, расход

¹ Гаврилов К.Л. Профессиональная диагностика ДВС систем: топливоснабжения, зажигания, энергоснабжения, пуска автомобилей, дорожно-строительных машин и сельскохозяйственных машин: учебное пособие. 4-е изд. Сергиев Посад: Российский центр сельскохозяйственного консультирования, 2017. 720 с.

² Там же.

³ Там же.

воздуха двигателем на холостом ходу и др.⁴ [1; 2; 9; 11–13]. Так, по зависимостям падения давления топлива в рампе от пропускной способности ЭФМ выявлены закономерности, свидетельствующие, что очистку форсунок целесообразно проводить при снижении их пропускной способности на величину 5–12 %, замену – при снижении пропускной способности на величину более 15 % [1].

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 в ультразвуковых ваннах и водных растворах, содержащих поверхностно-активные вещества⁵ [4].

При использовании способа очистки форсунок (без монтажа устройства с двигателя) с использованием химической добавки реагенты вводят в находящийся в топливном баке бензин каждые 2–3 тыс. км пробега [4]. В способе с непосредственной подачей специальной жидкости на вход топливной рампы двигателя очистку форсунок проводят через каждые 20 тыс. км пробега⁶. Наиболее часто встречающимися в литературе величинами наработки, при которой возникает необходимость очистки форсунок, является пробег автомобиля от 20 до 40 тыс. км⁷ [8; 11; 12]. Причем, представленные данные имеют рекомендательный характер. Это связано не только с маркой автомобиля и двигателя, но и с регионом, в котором транспортное средство эксплуатируется. Так, для автомобилей ГАЗ (с двигателем ЗМЗ-4062.10), эксплуатирующихся в Омске, периодичность очистки ЭФМ составила 30 тыс. км пробега [12].

Анализируя приведенную информацию следует отметить, что при очевидных достоинствах, связанных с представленными для запуска процедур очистки форсунок изменениями диагностических параметров, существуют и недостатки, к которым в первую очередь относятся отсут-

ствие сведений, представляющих как минимум обобщение для разных марок автомобилей, двигателей. Поэтому целесообразно провести оценку технического состояния топливных форсунок не на двигателе, а на стенде; испытывать не один или несколько, а не менее 15 комплектов снятых с моторов форсунок, которыми оснащены силовые агрегаты автомобилей с разным пробегом. Целью таких исследований является установление связи параметров, определяемых на стенде, с величинами пробега автомобилей.

1. Экспериментальная часть

Объектами исследования были ЭМФ бензиновых двигателей с распределенным впрыском топлива. Форсунки эксплуатировались в силовых агрегатах автомобилей ГАЗ-27040 V («Газель»), ZAZ Chance SX, ВАЗ 2121 («Нива»), Chevrolet Lacetti и др. Испытания проводили на 19 комплектах форсунок (в каждом комплекте по 4 форсунки), снятых с двигателей автомобилей с пробегом от 0 до 188 тыс. км.

Техническое состояние устройства впрыска топлива оценивали, используя прибор для очистки и анализа топливных форсунок НР-6В в комплекте с ультразвуковой ванной Ultrasonic Cleaner. Испытывали форсунки Siemens DEKA ZMZ 6354, Siemens DEKA VAZ 6238, Siemens DEKA VAZ 20734, Siemens DEKA VAZ 20735, Bosch 0 280 158 502, Bosch 0 280 158 017, Bosch 0 280 158 022, Bosch 0 280 150 996, Denso 23209-39145.

Измерения расхода тестовой жидкости (ТЖ; LAVR Ln 2004), прокачиваемой через форсунки насосом, осуществляли в автоматическом и ручном режимах настройки частоты n_t , ширины τ и числа импульсов N_t ⁸ [4; 10]. Режим 1 – атомизация (форсунки находятся в постоянно открытом состоянии); 2 – холостой ход, $n = 650 \text{ мин}^{-1}$ («минимум»), $\tau = 3 \text{ мс}$, $N_t = 2000$ импульсов; 3 – максимальная нагрузка, $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$, $\tau = 12 \text{ мс}$, $N_t = 1000$ импульсов; 4 – работа при высоких скоростях, $n = 3600 \text{ мин}^{-1}$, $\tau = 6 \text{ мс}$, $N_t = 2000$ импульсов.

⁴ Гаврилов К.Л. Профессиональная диагностика ДВС систем: топливоснабжения, зажигания, энергоснабжения, пуска автомобилей, дорожно-строительных машин и сельскохозяйственных машин: учебное пособие. 4-е изд. Сергиев Посад: Российский центр сельскохозяйственного консультирования, 2017. 720 с.

⁵ Там же.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

⁸ Гаврилов К.Л. Профессиональная диагностика ДВС систем: топливоснабжения, зажигания, энергоснабжения, пуска автомобилей, дорожно-строительных машин и сельскохозяйственных машин: учебное пособие. 4-е изд. Сергиев Посад: Российский центр сельскохозяйственного консультирования, 2017. 720 с.

Расход q_i тестовой жидкости при испытании форсунок рассчитывали по формуле

$$q_i = \frac{Q_i}{t}, \quad (1)$$

где Q_i – объем топлива за время измерения t , мл; t – время измерения, мин.

2. Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований установлено, что расход тестовой жидкости в режиме 1 (атомизация) для форсунок, снятых с автомобилей с разным пробегом, не может быть обобщающим параметром, по которому следует оценивать техническое состояние устройства от пробега. Это связано с тем, что q отражает не только зависящую от наработки степень загрязнения форсунок, но и разницу в пропускной способности изделия (регламент производителя). Поэтому целесообразно для объектов исследования, отличающихся изначально производительностью, оценку технического состояния проводить по среднему значению погрешности измерения (Δq_{cp}) расхода ТЖ:

$$\Delta q_{cp} = \frac{\sum_i \pm \Delta q_i}{n}, \quad (2)$$

где $\pm \Delta q_i$ – погрешность среднего арифметического расхода тестовой жидкости, мл·мин⁻¹; n – число значений параметра $\pm \Delta q_i$ в интервале пробега.

Параметр $\pm \Delta q_i$ рассчитывали по формуле

$$\pm \Delta q_i = t_{0,95} \frac{s}{\sqrt{n_{изм}}}, \quad (3)$$

где $t_{0,95}$ – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности 0,95; s – стандартное отклонение; $n_{изм}$ – число измерений (для комплекта из четырех форсунок $n_{изм} = 4$).

В табл. 1 представлены рассчитанные параметры $\pm \Delta q_i$ для форсунок с наработкой 57 и 150 тыс. км пробега. Из сопоставления данных следует, что значение $\pm \Delta q_i$, полученное в режиме 2, резко отличается от погрешности среднего арифметического расхода тестовой жидкости режимов 1, 3 и 4. Причем такое же отличие наблюдается и для фор-

сунок с другими показателями наработки. Поэтому при расчете Δq_{cp} по всем режимам испытания данные режима 2 не учитывали.

Таблица 1

Значения погрешности измерения $\pm \Delta q_i$ расхода тестовой жидкости при различных режимах испытания форсунок

Режим ручной настройки	Bosch 0 280 158 502 с пробегом 57 тыс. км, $\pm \Delta q_i$	Bosch 0 280 158 502 с пробегом 150 тыс. км, $\pm \Delta q_i$
1	1,8	21,4
2	0,4	1,7
3	1,6	14,1
4	1,3	13,4

Table 1

Values of measurement error $\pm \Delta q_i$ of the test liquid flow rate in various injector test modes

Manual tuning mode	Bosch 0 280 158 502 with a mileage of 57 thousand km, $\pm \Delta q_i$	Bosch 0 280 158 502 with mileage of 150 thousand km, $\pm \Delta q_i$
1	1.8	21.4
2	0.4	1.7
3	1.6	14.1
4	1.3	13.4

Таблица 2

Средние значения погрешности $\Delta q_{cp}, y_i$ измерения расхода ТЖ в интервале пробега L

L , тыс. км				
0–33	33–66	66–99	99–132	132–165
Δq_{cp}				
1,5	2,4	6,0	7,5	9,5

Table 2

Average values of the error $\Delta q_{cp}, y_i$ of measuring the flow rate of the test liquid in the run interval L

L , thousands km				
0–33	33–66	66–99	99–132	132–165
Δq_{avg}				
1.5	2.4	6.0	7.5	9.5

Из анализа данных (табл. 2) следует, что с увеличением пробега автомобиля наблюдается рост параметра $\Delta q_{cp}(y_i)$. Это свидетельствует о существовании связи между Δq_{cp} и L , исследование которой проводили, используя табличный

процессор Microsoft Office Excel⁹ [14; 15]. Объясняющей переменной x_i при таком исследовании была середина интервала пробега L .

Степень тесноты связи между значениями пробега и средними значениями погрешности измерения расхода ТЖ оценивали корреляционным анализом. Установлено, что коэффициент корреляции между параметрами $\Delta q_{\text{ср}}$ и пробегом составил 0,99. Следовательно, связь между значениями пробега и средними значениями погрешности измерения расхода ТЖ полная, функциональная.

В табл. 3 представлены уравнения регрессии, полученные аппроксимацией данных с помощью линии тренда, и величины достоверности аппроксимации – коэффициенты детерминации.

Таблица 3

Уравнения регрессии и величины достоверности аппроксимации R^2		
№ п. п.	Уравнение	R^2
1	$\hat{y} = 1,2875 \exp(1 \cdot 10^{-5}x)$	0,9345
2	$\hat{y} = 0,00006x + 0,073$	0,9723
3	$\hat{y} = 6 \cdot 10^{-5}x + 7 \cdot 10^{-12}x^2 + 0,1039$	0,9723
4	$\hat{y} = 0,0002x^{0,8901}$	0,9360

Table 3

Regression equations and approximation confidence values R^2		
Item number	Equation	R^2
1	$\hat{y} = 1.2875 \exp(1 \cdot 10^{-5}x)$	0.9345
2	$\hat{y} = 0.00006x + 0.073$	0.9723
3	$\hat{y} = 6 \cdot 10^{-5}x + 7 \cdot 10^{-12}x^2 + 0.1039$	0.9723
4	$\hat{y} = 0.0002x^{0.8901}$	0.9360

Регрессия в виде квадратичного уравнения нелинейная относительно объясняющих перемен-

ных и линейная относительно параметров модели¹⁰. Поэтому оценки метода наименьших квадратов преобразованной линейной модели, полученные при помощи функции «Регрессия» табличного процессора Microsoft Office Excel, являются оценками параметров нелинейной модели (табл. 4: параметры $F_{\text{расч}}$, R^2). Экспоненциальные и степенные модели, относящиеся к нелинейной по параметрам регрессии, внутренне линейные¹¹. Модель степенной регрессии $y_i = ax_i^b \varepsilon_i$ (a и b – коэффициенты регрессии, ε_i – случайная ошибка регрессии) после логарифмирования (линеаризации) $\ln y_i = \ln a + b \cdot \ln x_i + \ln \varepsilon_i$ и замены $\ln y_i$, $\ln a$, $\ln x_i$, $\ln \varepsilon_i$ на y^* , a^* , x_i^* , ε_i^* преобразуется в линейное уравнение вида $y_i^* = a^* + bx_i^* + \varepsilon_i^*$. Идентично и для модели $y_i = ae^{bx_i} \varepsilon_i$ (табл. 3) после логарифмирования $y_i^* = \ln y_i$, $\varepsilon_i^* = \ln \varepsilon_i$, $a^* = \ln a$ экспоненциальное уравнение преобразуется в линейное: $y_i^* = a^* + bx_i^* + \varepsilon_i^*$.

Для линеаризованной экспоненциальной модели в итоговых данных инструмента анализа «Регрессия» $\hat{a}^* = 0,2527$, $\hat{b}^* = 1,46397 \cdot 10^{-5}$. Искомое значение a в модели $y_i = ae^{bx_i} \varepsilon_i$ составило $a = e^{\hat{a}^*} = 1,287479$. Оцененная экспоненциальная модель приобретает вид $y = 1,287479 \exp(1,46397 \cdot 10^{-5}x)$, степенная после аналогичных преобразований – $y = 0,000224x^{0,890094}$.

Проверку статистической значимости уравнений регрессии проводили по критерию Фишера $F_{\text{расч}}$. Прогностическое качество оценивали индексом корреляции η ($\eta = R^2$). Вычисляли также среднюю относительную ошибку аппроксимации \bar{A} . Табличное значение критерия Фишера (критическое значение $F_{\text{крит}}$) определяли с помощью встроенной функции Excel «ФРАСПОБР» при уровне значимости 0,05. В уравнениях для расчета использовали \hat{y} – теоретическое (расчетное, предсказанное) значение $\Delta q_{\text{ср}}$; y_i – текущий параметр $\Delta q_{\text{ср}}$ (табл. 2); \bar{y} – средняя величина $\Delta q_{\text{ср}}$; n – число наблюдений; m – число параметров при переменных x . Результаты расчетов приведены в табл. 4.

⁹ Абдуллин Р.З., Абдуллин В.Р. Эконометрика в MS Excel: практикум. Иркутск: Изд-во БГУ, 2016. 135 с. URL: <http://lib-catalog.isea.ru> (дата обращения: 20.12.2021); Воскобойников Ю.Е. Эконометрика в Excel: в 2 ч. Ч. 1. Парный и множественный регрессионный анализ: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2005. 156 с.; Кадочникова Е.И. Эконометрика: конспект лекций. Казань: Казанский федеральный университет, 2013. 106 с.; Ляховецкий А.М., Кремянская Е.В., Климова Н.В. Статистика: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2016. 362 с.

¹⁰ Абдуллин Р.З., Абдуллин В.Р. Эконометрика в MS Excel: практикум. Иркутск: Изд-во БГУ, 2016. 135 с. URL: <http://lib-catalog.isea.ru> (дата обращения: 20.12.2021).

¹¹ Там же.

Таблица 4

Характеристика регрессионных моделей

Регрессия	\bar{A} , %	η	$F_{расч}$	$F_{крит}$	R^2
Квадратичная	14	0.9861	35.1	19.0	0.9723
Линейная	14	0.9861	105.4	10.1	0.9723
Экспоненциальная	15	0.9834	27.5	10.1	0.9671
Степенная	15	0.9799	61.1	10.1	0.9602

Table 4

Characterization of regression models

Regression	\bar{A} , %	η	$F_{estimate}$	$F_{critical}$	R^2
Quadratic	14	0.9861	35,1	19,0	0,9723
Linear	14	0,9861	105,4	10,1	0,9723
Exponential	15	0,9834	27,5	10,1	0,9671
Nonlinear	15	0,9799	61,1	10,1	0,9602

Критерием статистической значимости (адекватности) уравнений регрессии является условие, при котором $F_{расч} > F_{крит}$. Этому условию удовлетворяют значения критерия Фишера квадратичной, линейной, экспоненциальной и степенной регрессий (табл. 4). Точность математической модели оценивают по величине ошибки аппроксимации. Высокая точность модели характеризуется значениями \bar{A} ниже 10 %. Таким значением не обладает ни одна из представленных моделей (табл. 4). Поэтому был проведен расчет параметров экспоненциальной и степенной регрессий нелинейным оцениванием с использованием надстройки «Поиск решения» [15; 16]. В надстройке реализован поиск решения нелинейных задач методом обобщенного понижающего градиента. В табл. 5 представлены результаты проведенного расчета.

Таблица 5

Нелинейное оценивание параметров экспоненциальной и степенной регрессий

Уравнение после нелинейного оценивания	\bar{A} , %	η	$F_{расч}$	$F_{крит}$	R^2
$\hat{y} = 1,170 \exp(1,460 \cdot 10^{-5}x)$	12	0,9296	24,6	10,1	0,8642
$\hat{y} = 0,0001136x^{0,9522}$	14	0,9854	98,7	10,1	0,9710

Table 5

Nonlinear estimation of parameters of exponential and nonlinear regressions

Equation after nonlinear estimation	\bar{A} , %	η	$F_{estimate}$	$F_{critical}$	R^2
$\hat{y} = 1.170 \exp(1.460 \cdot 10^{-5}x)$	12	0.9296	24.6	10.1	0.8642
$\hat{y} = 0.0001136x^{0.9522}$	14	0.9854	98.7	10.1	0.9710

Из анализа данных (табл. 4, 5) следует, что все модели являются грубым приближением регрессии к реальной зависимости (значение средней ошибки аппроксимации для грубых моделей не должно превышать 15 %). Линейная и степенная регрессии более адекватно, чем квадратичная и экспоненциальная модели, описывают исходные данные.

Представленные модели могут быть использованы для практического применения, но с поправками, учитывающими количество объектов испытания. Так, для разработки систем обеспечения работоспособности электроники, управляемой двигателем, минимальный объем выборки обследования электронных компонентов составлял 58 [17]. Изменение интенсивности отказов электромагнитных форсунок от пробега автомобиля, установленное по представленным в работе данным, описывается экспоненциальной регрессией. При малом числе обследованных объектов (малая выборка) следует учитывать метод статистической обработки, предназначенный для работы именно с таким количеством результатов испытаний [18].

Заключение

Средние значения погрешности измерения расхода тестовой жидкости, наблюдаемые при испытании форсунок на стенде, связанные с пробегом автомобиля. Чем больше пробег, тем выше средние значения погрешности измерения расхода. Показано, что зависимость средних значений погрешности измерения расхода тестовой жидкости от пробега может быть описана в грубом приближении регрессией.

Список литературы

1. *Веревтин 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. *Цэдашиев 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 имени 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 НГГИ. 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. Муташиур. 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 впрысковых ДВС с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. 2007. № 8. С. 29–31.

10. Баженов Ю.В., Каленов В.П. Прогнозирование остаточного ресурса электронных систем управления двигателем // Вестник СибАДИ. 2017. № 2 (54). С. 52–59. [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-52-59](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-52-59)

11. Грицай А.В., Горбань М.В., Аракельянц А.Г. Исследование работы инжекторного двигателя с электромагнитными форсунками различного технического состояния // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: электронный сборник статей по материалам XXI студенческой международной заочной научно-практической конференции. 2014. № 6 (21). С. 109–114.

12. Залознов И.П. Повышение эффективности эксплуатации автомобилей за счет обоснования периодичности обслуживания электромагнитных форсунок: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2003. 115 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. 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.

15. Яковлев В.Б. Линейное и нелинейное оценивание параметров регрессии в Microsoft Excel // Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования. 2019. № 2 (48). С. 58–71.

16. Владленова В.О., Турундаевский В.Б. Некоторые особенности, возникающие при изучении нелинейной регрессии с использованием Excel и других программ // Экономика, статистика и информатика. 2014. № 1. С. 158–161.

17. Каленов В.П. Разработка системы обеспечения работоспособности электронных систем управления двигателем автомобиля в эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2018. 164 с.

18. Горбунова Е.Б. Метод статистической обработки малых выборок данных в задачах прогнозирования и контроля состояния сложных систем: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2018. 178 с.

References

1. Vereyutin AYu. *A method for diagnosing electromagnetic nozzles of engines with gasoline injection* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Ryazan; 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 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). Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky; 2016. p. 253–258. (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 Publ.; 2018. (In Russ.)

5. Zelenin VA, Sukhanov SA. Method for preliminary diagnosing performance gasoline engine type injector. *Scientific Bulletin NSHTI*. 2017;3:33–36. (In Russ.)

6. Berezyukov DS. *Development of a method for in-place diagnostics of electromagnetic injectors of internal combustion engines with light fuel injection and a study of changes in their performance* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Volgograd; 2012. (In Russ.)
7. Kiselev DV, Shurin SA. Flushing injectors and fuel rail of a gasoline engine without dismantling and using specialized equipment. *Scientific Problems of Logistics 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, Merkushov YuN. Functional diagnostics of electromagnetic injectors of injection internal combustion engines with spark ignition. *Automotive Industry*. 2007;(8):29–31. (In Russ.)
10. Bazhenov YuV, Kalenov VP. Forecasting the residual life of electronic engine control systems. *Bulletin of SibADI. Section II. Transport*. 2017;(2(45)):52–59.
11. Gritsay AV, Gorban MV, Arakelyants AG. Study of the operation of an injection engine with electromagnetic nozzles of various technical conditions. *Scientific Community of Students of the 21st century. Technical Science: Electronic Collection of Articles based on Materials of the 21st International Student Correspondence Scientific and Practical Conference*. 2014;(6(21)):109–114. (In Russ.)
12. Zaloznov IP. *Improving the efficiency of car operation by substantiating the frequency of maintenance of electromagnetic injectors* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Omsk; 2003. (In Russ.)
13. Bakaikin DD, Gritsenko AV, Abrosimov DA. Diagnosing electromagnetic ICE injectors at text modes. *Agro-Industrial Complex of Russia*. 2015;72(1):16–18. (In Russ.)
14. Bazhenov YV, Kalenov VP. The forecasting of the residual resource of electronic engine control system. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017;(2(54)):52–59. (In Russ.) [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-52-59](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-52-59)
15. Yakovlev VB. Linear and non-linear estimation of regression parameters in Microsoft Excel. *MCU Journal of Informatics and Informatization of Education*. 2019;(2(48)):58–71. (In Russ.)
16. Vladlenova VO, Turundaevsky VB. Some peculiarities arising in the study of nonlinear regression using Excel and other programs. *Economics, Statistics and Computer Science*. 2014;(1):158–161. (In Russ.)
17. Kalenov VP. *Development of a system for ensuring the operability of electronic control systems for a car engine in operation* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Vladimir; 2018. (In Russ.)
18. Gorbunova EB. *A method of statistical processing of small data samples in the problems of forecasting and monitoring the state of complex systems* (dissertation of Candidate of Technical Sciences). Novocherkassk; 2018. (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; 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; khlopkov-sv@rudn.ru

Басова Влада Валерьевна, магистрант, департамент транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-1325-4646; 1032202133@rudn.ru

Телков Олег Игоревич, магистрант, департамент транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-1412-6539; 1032202136@rudn.ru

Космачева Анастасия Дмитриевна, магистрант, департамент транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-3749-5225; 1032202134@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; 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; 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; ORCID: 0000-0002-1325-4646; 1032202133@rudn.ru

Oleg I. Telkov, master's student, Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1412-6539; 1032202136@rudn.ru

Anastasia D. Kosmacheva, master's student, Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3749-5225; 1032202134@rudn.ru




DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-155-164
УДК 004.358

Научная статья / Research article

Дополненная реальность в интеллектуальной системе управления транспортным средством

Л.В. Круглова , Фафа К. Сисей 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 kruglova-lv@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 февраля 2022 г.

Доработана: 20 мая 2022 г.

Принята к публикации: 28 мая 2022 г.

Ключевые слова:

виртуальная реальность, дополненная реальность, транспортное средство, интеллектуальные системы управления

Аннотация. Использование дополненной реальности в интеллектуальных системах управления транспортными средствами – важная и актуальная задача производства и эксплуатации автомобилей. Наряду с разработкой сенсоров необходимо создание алгоритмического и программного обеспечения таких систем. Описана программа, моделирующая формирование изображения дополненной реальности на проекционном дисплее, расположенном на лобовом стекле машины. Моделирование контента дополненной реальности предлагается осуществлять путем объединения изображения, видимого через лобовое стекло, и данных, поступающих от сенсоров интеллектуальной системы управления автомобилем. Функционирование интеллектуальной системы управления автомобилем базируется на принципе Sensor Fusion, в соответствии с которым входные данные от нескольких дискретных датчиков объединяются для получения виртуальной модели окружающей среды. Основным достоинством разработанной программы является возможность адаптивной настройки параметров изображения в зависимости от условий окружающей среды. В программе также реализована функция переключения каналов информации для отображения данных от различных устройств. Применение технологий дополненной реальности в интеллектуальных системах управления транспортными средствами способствует не только удобству эксплуатации автомобиля, но также улучшает комфортность условий поездки, повышает уровень безопасности вождения.

Для цитирования


Круглова Л.В., Сисей Ф.К. Дополненная реальность в интеллектуальной системе управления транспортным средством // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 155–164. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-155-164>



Augmented reality in an intelligent vehicle control system

Larisa V. Kruglova  , Fafa K. Ceesay 

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

 kruglova-lv@rudn.ru

Article history

Received: February 14, 2022

Revised: May 20, 2022

Accepted: May 28, 2022

Keywords:

virtual reality, augmented reality, vehicle, intelligent control systems

Abstract. The use of augmented reality in intelligent vehicle control systems is an important and urgent task for the production and operation of vehicles. Along with the development of sensors, it is necessary to create algorithms and software for such systems. The paper describes a program that simulates the formation of an augmented reality image on a projection display located on the windshield of a car. Augmented reality content modeling is proposed to be carried out by combining the image seen through the windshield and the data coming from the sensors of the intelligent car control system. The functioning of an intelligent vehicle control system is based on the principle of Sensor Fusion, according to which the input data from several discrete sensors are combined to obtain a virtual environment model. The main advantage of the developed program is the possibility of adaptive adjustment of image parameters depending on environmental conditions. The program also implements the function of switching information channels to display data from various devices. The use of augmented reality technologies in intelligent vehicle control systems contributes not only to the convenience of car operation, but also improves the comfort of travel conditions, increases the level of driving safety.

For citation

Kruglova LV, Ceesay FK. Augmented reality in an intelligent vehicle control system. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):155–164. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-155-164>

Введение

В последние годы многие производители автомобильных транспортных систем проявили большой интерес к дополненной реальности (AR), главным образом из-за ее доступности и потенциала для создания инновационных решений. AR – это форма человеко-машинного интерфейса (HMI), в которую виртуальные компоненты вставляются и накладываются на реальный мир, создавая иллюзию «обогащенной» реальности. Это позволяет пользователям получать необходимую им информацию об определенных аспектах или процедурах непосредственно в рабочей среде [1] и потенциально может обогатить сенсорное восприятие человека [2]. Основываясь на определении П. Милгрэмом континуума реальности и виртуальности [3], можно сказать, что AR является неотъемлемой частью смешанной реальности, которая представляет собой слияние реального и виртуального миров. Приложения AR

варьируются от предназначенных для промышленности и производства (робототехника, транспорт, здравоохранение, образование) до услуг, используемых в повседневной деятельности (игры, развлечения и т. д.).

Существуют обширные исследования, в которых рассматривается влияние дополненной реальности на автомобильную промышленность, а также проблемы и направления развития в этой области [4–9].

AR открывает новые многообещающие возможности практически во всех областях автомобильной промышленности. Например, AR может значительно улучшить пользовательский интерфейс с помощью проекционных дисплеев (head-up display, HUD) – прозрачных устройств, предназначенных для представления различной важной информации в поле зрения водителя в режиме реального времени [10].

AR вносит вклад во многие другие этапы автомобильного производства, такие как техническое

обслуживание, ремонт, диагностика, обучение [1] специалистов по производству и потребителей продукции и т. д. Тестирование точечной сварки с использованием пространственной дополненной реальности на основе проектора, визуализация некоторых частей автомобиля с помощью портативных устройств [11] или выполнение процедур технического обслуживания с применением головных дисплеев (HMDS) – вот некоторые примеры использования дополненной реальности. Технология AR внедрена в качестве маркетингового инструмента, чтобы клиенты могли интерактивно настраивать свой автомобиль перед покупкой [12; 13].

Системы виртуальной и дополненной реальности используют информацию, полученную от интеллектуальной системы управления автомобилем.

1. Сенсоры интеллектуальной системы управления автомобилем

Интеллектуальные системы управления транспортными средствами базируются на использовании датчиков, данные которых объединяются, создавая виртуальную рабочую среду. Датчики делятся на две категории: внешние и внутренние.

Внешние датчики предоставляют информацию об окружающем пространстве транспортного средства, позволяя рассчитать безопасную и эффективную траекторию движения к месту назначения. В первую очередь они включают радар, лидар, ультразвуковые датчики, GPS-контроллер и дневную видеокамеру.

Радарные датчики, применяемые в настоящее время в некоторых системах адаптивного круиз-контроля, обеспечивают максимальную четкость определения относительной скорости. Используя эффект Доплера, они могут определять относительную скорость объектов вокруг транспортного средства. Из-за широкого угла обзора радар не может адекватно различить форму и контур небольших объектов. Его наилучшим применением в интеллектуальном транспортном средстве является быстрое определение скорости сближения и обнаружение объектов на большом расстоянии [14].

Лидар обеспечивает более точное виртуальное изображение окружающего мира непосредственно вокруг транспортного средства. Из-за узкого угла луча лазера для покрытия целевой области необходим механический сканер. Это приводит

к некоторой задержке по сравнению с радаром, но вместе они обеспечивают плавность изображения окружения транспортного средства. Интеллектуальное транспортное средство может включать в себя несколько лидарных датчиков для повышения качества модели виртуального мира.

Ультразвуковые датчики в настоящее время есть в большинстве систем обнаружения. Они обеспечивают точность обнаружения ближних препятствий и могут использоваться для получения виртуального изображения ближних объектов вокруг всего транспортного средства. Это позволяет менять полосу движения и выполнять экстренные маневры без непреднамеренного столкновения с близлежащими объектами.

GPS-контроллер (GPS-трекер) обеспечивает определение абсолютного местоположения, навигацию и привязку скорости к координатам объекта. Это позволяет вычислять ускорение и скорость в макромасштабе на основе картографических данных и моделей дорог, а также обеспечивает непрерывную калибровку инерциального измерительного блока (ИДУ) и датчиков скорости.

Инфракрасный (ИК) приемопередатчик устанавливается за ветровым стеклом автомобиля, обычно перед зеркалом заднего вида. Он принимает инфракрасные сигналы от ИК-маяков и передает их обратно.

Магнитный датчик – это небольшой твердотельный блок, который воспринимает магнитное поле Земли. Обычно он монтируется на крыше транспортного средства, как можно дальше от источников магнитных помех, таких как двигатель.

Внутренние датчики включают в себя множество датчиков транспортного средства, которые информируют компьютер транспортного средства о рабочем состоянии различных подсистем. Ключевыми, связанными с интеллектуальным управлением автомобилем, являются датчики скорости вращения колеса, угла поворота рулевого колеса, датчики рыскания и ускорения автомобиля.

Датчики скорости вращения колеса и угла поворота рулевого колеса используются совместно для обеспечения обратной связи по замкнутому контуру с контроллером транспортного средства. При задании траектории рулевое колесо будет поворачиваться, и дифференциальный крутящий момент будет приложен к ведущим колесам. Обратная связь с датчиком поможет предотвратить проскальзывание колес и позволит виртуальной модели вычислять абсолютное положение автомобиля.

Датчики рыскания и ускорения, объединенные в инерциальный измерительный блок (inertial measurement unit, IMU), обеспечивают исправление ошибок для датчиков скорости вращения колеса и угла поворота рулевого колеса. Данные IMU позволяют использовать обратную связь с замкнутым контуром для коррекции скольжения и предотвращения потери управления.

Процессор представляет собой микрокомпьютер, функция которого заключается в приеме входных данных от блока управления и датчиков транспортного средства, декодировании информации, отслеживании местоположения транспортного средства, передаче данных на дисплей для представления водителю и передаче информации во внешние системы. Обычно он монтируется под сиденьем или в багажнике, хотя дальнейшая миниатюризация может привести к тому, что в более поздних системах он будет интегрирован с дисплейным блоком.

2. Интеллектуальная система управления автомобилем

Автомобиль с интеллектуальной системой рулевого управления, торможения и регулированием мощностью отдельных колес в режиме реального времени может обеспечить беспрецедентный уровень безопасности и эффективности в различных условиях. Это достигается путем объединения входных сигналов датчиков, определения оптимальных траекторий и поддержания замкнутого контура управления динамикой транспортного средства.

Различные датчики обеспечивают входные данные, необходимые компьютеру транспортного средства для построения виртуального изображения окружающего мира. Современные автомобили оснащены точными датчиками скорости для управления автоматической коробкой передач и датчиками скорости вращения колес для включения системы ABS. Интеллектуальные системы управления автомобилем включают в себя ультразвуковые или основанные на видеокамерах резервные системы предупреждения и аналогичные системы обнаружения боковых слепых зон. Действуя независимо, эти датчики прямо или косвенно предоставляют водителю информацию о результатах измерений. Интеллектуальная система управления с технологией Sensor Fusion объединяет вышеуказанные данные с датчиками скорости и расстояния дальнего действия для со-

здания виртуальной модели объектов вокруг транспортного средства [14].

Активное управление перемещением по полосе движения как часть технологии Sensor Fusion позволяет транспортному средству сохранять центральное положение между полосами движения на основе анализа изображений маркеров полосы движения и входных данных от других датчиков транспортного средства. На основе этих входных данных вычисляются оптимальные траектории либо для следования изгибу дороги, либо для избегания опасностей на дороге [15].

Если перед транспортным средством возникает препятствие, датчики обнаружения препятствия сообщают виртуальной модели его размер и местоположение.

Затем интеллектуальная система управления транспортным средством решает обратную кинематическую задачу для управления тормозами, двигателями и рулевым колесом транспортного средства.

Маневр торможения на высокой скорости требует ввода данных от всех четырех датчиков скорости колеса для определения пробуксовки колес, датчика рыскания для определения изменения положения транспортного средства и акселерометра для вычисления абсолютного ускорения вдоль траектории. Данные поступают непосредственно в виртуальную модель, гарантируя, что все входные сигналы управления транспортным средством соответствуют его текущему положению и ускорению [16].

При управлении водителем-человеком такие алгоритмы обеспечивают контроль устойчивости в случае, если транспортное средство потеряет сцепление с дорогой во время маневрирования.

Применение интеллектуальных систем управления направлено на повышение эффективности, производительности и безопасности автомобилей. Такие системы включают в себя:

- *объединение сенсорных данных* – компьютерная модель, которая объединяет входные данные от нескольких дискретных датчиков для получения виртуального изображения окружающей среды;

- *полностью электрический привод* – система привода, которая позволяет полностью контролировать скорость и крутящий момент отдельных колес с помощью отдельных колесных двигателей;

- *дифференциальный контроль стабильности крутящего момента* предоставляет возможность

модулировать крутящий момент на каждом ведущем колесе для повышения устойчивости автомобиля, уменьшения проскальзывания колес и улучшения сцепления на неровных или скользких поверхностях;

– *управление скоростью рыскания* – в сочетании с контролем устойчивости функция контроля скорости рыскания сравнивает скорость рыскания автомобиля с ожидаемой скоростью рыскания на основе данных системы рулевого управления и скорости. Этот дифференциал может регулировать мощность двигателя и процесс торможения, чтобы предотвратить потерю управления автомобилем [16; 17];

– *датчики положения* и перемещения могут решать самые разные задачи: измерять положение и перемещение (угловое, линейное) рабочих органов машин или механизмов, других объектов, а также выполнять функции передачи данных о состоянии транспортного средства дальше в систему, реализуя в качестве звена обратной связи системы слежения в различного рода автоматизированных системах управления.

3. Когнитивные функции интеллектуальных систем управления транспортными средствами

Когнитивный искусственный интеллект. Термин «когнитивный» возник в психологии для обозначения познавательной деятельности человека, а затем перешел в область техники и технологии для определения интеллектуальных технических систем, способных к самообучению. Когнитивный искусственный интеллект способен самообучаться или самосовершенствоваться. В рамках искусственного интеллекта разрабатываются искусственные когнитивные системы, накапливающие знания в процессе обучения [18].

Базы данных и базы знаний. Данные – это информация, полученная в результате наблюдений или измерений отдельных характеристик (свойств), характеризующих объекты, процессы и явления в данной области. Знания (с точки зрения представления знаний в интеллектуальных системах) – это связи и закономерности предметной области (принципы, модели, законы), которые были получены в результате практической деятельности и профессионального опыта и позволяют специалистам выявлять и решать проблемы в этой области.

Система управления движением интеллектуальных транспортных средств на автомагистралях. Для контроля и управления движением интеллектуальных транспортных средств на автомагистралях используются интеллектуальные встроенные контроллеры дорожной инфраструктуры, светофоры, системы оповещения на светодиодных панелях, детекторы обнаружения транспортных средств, камеры наблюдения.

Такие системы можно условно разделить на несколько функциональных групп:

– детекторы транспортных средств – собирают информацию о транспортном потоке, включая количество транспортных средств, их скорость, местоположение, а затем отправляют эту информацию на интеллектуальный встроенный компьютер через систему беспроводной передачи;

– встроенный компьютер как часть контроллера управления дорожным движением – вычисляет и анализирует данные для определения состояния транспортного потока, затем посылает управляющие сигналы на светофоры и предупреждающие табло, тем самым создавая условия для непрерывного процесса движения и предотвращения заторов на шоссе;

– контроллер управления дорожным движением – также может отправлять информацию на средства уведомления водителей о пробках на шоссе и об альтернативных способах объезда заторов.

Интеллектуальная система контроля положения транспортного средства. Определение положения объекта, регистрация маршрута и скорости движения осуществляется GPS-контроллером системы. Мониторинг времени движения, парковки и работы оборудования выполняется с помощью специальных датчиков. Данные из бортовой системы объекта передаются на сервер по каналу GPRS, а также архивируются в энергонезависимой памяти бортовой системы (в случае отсутствия канала GPRS).

Основные особенности системы:

– графическое отображение текущего положения объекта на карте;

– графическое отображение на карте маршрута объекта;

– контроль пробега;

– контроль времени в пути, парковки;

– контроль за соблюдением маршрута;

– регистрация работы исполнительного оборудования.

Система контроля положения транспортного средства предназначена для дистанционного мониторинга интеллектуальных транспортных средств. Она позволяет получать оперативную информацию о местоположении и маршруте автомобиля в режиме реального времени. Кроме того, предоставляется полная информация о состоянии транспортного средства (пробег, время в пути, время стоянки и т. д.).

4. Дополненная реальность в интеллектуальной системе управления транспортными средствами

Дополненная реальность обладает огромным потенциалом для повышения эффективности эксплуатации автомобиля – от улучшения качества вождения до предотвращения несчастных случаев и предоставления полезной информации о направлениях движения¹.

Интегральные впечатления. С того момента, как клиент садится в автомобиль, AR, искусственный интеллект, интернет-приложения, программное обеспечение смартфона работают вместе, чтобы улучшить драйв и сделать предстоящее путешествие легким.

Навигация и маршрут следования. Благодаря встроенному дисплею HUD на лобовом стекле навигация упрощается, появляется информация об условиях на дороге по ходу движения, что делает поездку проще и безопаснее.

Точки интереса (points of interest, POI). Система поиска мест интереса (достопримечательностей) поможет легко найти все: от вариантов парковки до ближайшей заправочной станции на пути к следующему пункту назначения.

Система компьютерного зрения. Пешеходы, велосипедисты и другие потенциальные опасности на дороге могут быть непредсказуемыми. AR выделяет объекты, которые с наибольшей вероятностью могут представлять опасность, чтобы водитель мог безопасно избежать аварии.

Анализ окружающих объектов. Встроенные датчики передают информацию в режиме реаль-

ного времени непосредственно в AR, чтобы не только информировать водителя о том, что его окружает, но и предупреждать о внезапных изменениях скорости или полной остановке впереди идущих транспортных средств.

Интеллектуальная парковка. Используя пространственное моделирование, HUD отображает парковочные места, в которые может поместиться автомобиль, а также определяет связанные с этим затраты или временные ограничения для места.

Автоматическая адаптация. Независимо от того, едете ли вы по туннелю, выезжаете из гаража или двигаетесь при ярком дневном свете, HUD автомобиля адаптируется, чтобы водитель всегда мог четко видеть важную информацию, отображаемую с помощью AR.

Уведомления. Принимая телефонный звонок или получая важное сообщение, водитель никогда не должен отрывать взгляд от дороги. Интеграция HUD, микрофона и автомобильных динамиков гарантирует, что водителю больше никогда не придется смотреть на свой телефон во время вождения.

5. Моделирование дополненной реальности в интеллектуальной системе управления автомобилем

На основе представлений о функционировании интеллектуальной системы управления автомобильным транспортным средством разработана программа для отображения различной информации от сенсоров автомобиля, моделирующая работу системы дополненной реальности.

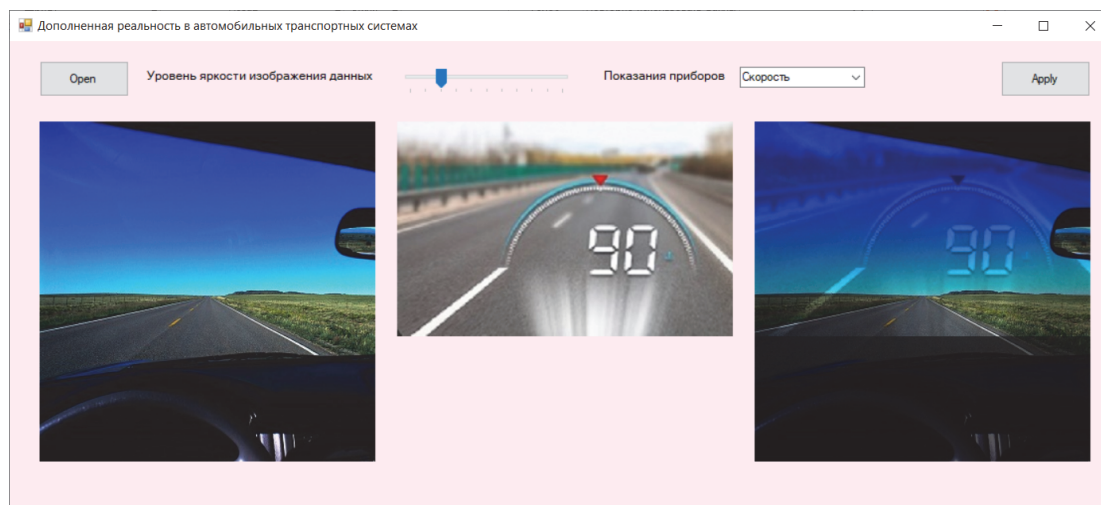
В основе алгоритма программы лежит процесс объединения изображения, видимого через лобовое стекло автомобиля, и данных, поступающих от сенсоров интеллектуальной системы автомобиля.

В верхней части окна программы расположен трекбар («ползунок») для задания уровня яркости изображения данных и поле со списком для выбора прибора, информация от которого отображается на лобовом стекле.

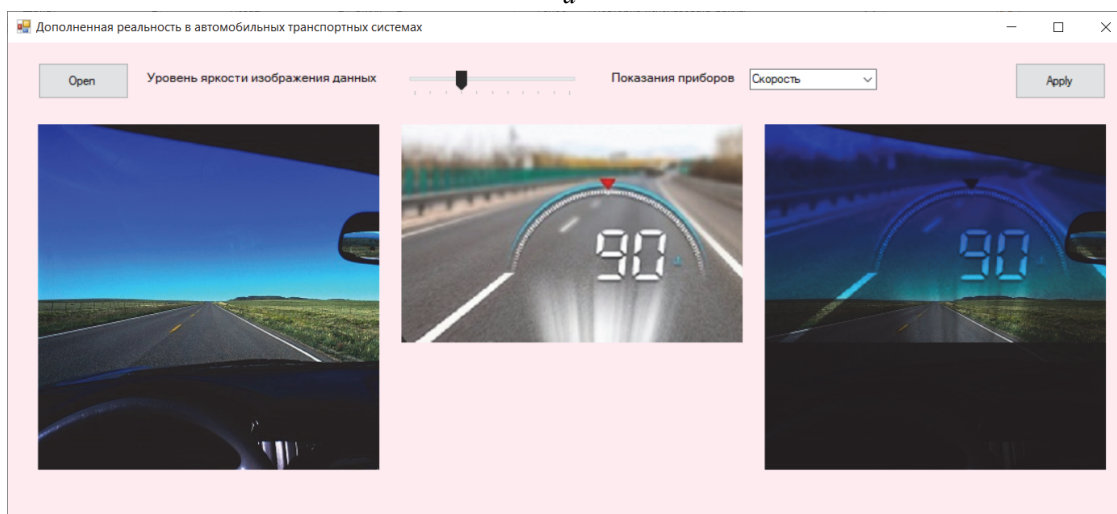
В главном окне программы расположены изображения:

- лобового стекла;
- показаний прибора;
- показаний прибора на лобовом стекле (рис. 1).

¹ The future of augmented reality (AR) in cars. URL: <https://plat4m.medium.com/the-future-of-augmented-reality-ar-in-cars-788933212aa9> (accessed: 25.02.2022).



a



б

Рис. 1. Главное окно программы: изображение лобового стекла, изображение показаний прибора, изображение показаний прибора на лобовом стекле при разных значениях уровня яркости изображения показаний прибора (датчика скорости)
Figure 1. The main window of the program: the image of the windshield, the image of the instrument readings, the image of the instrument readings on the windshield at different values of the brightness level of the image of the instrument readings (speed sensor)

Программа создана в программной среде Microsoft Visual Studio, реализована на языке C# по технологии Windows Forms.

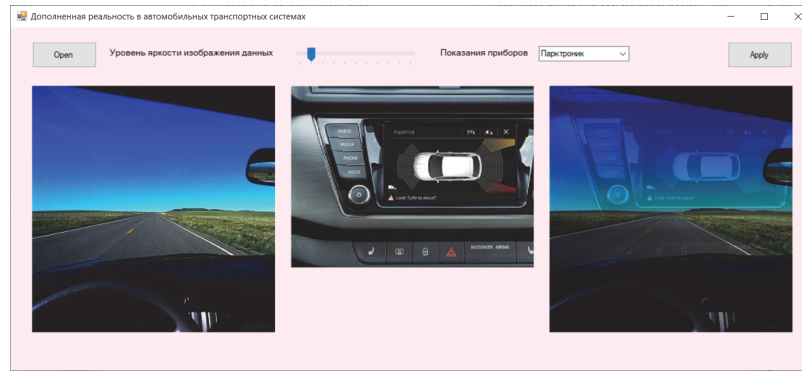
6. Результаты

В программе имеется возможность регулировать яркость изображения данных, поступающих от сенсоров интеллектуальной системы, имитирующая зависимость изображения данных от яркости освещения лобового стекла.

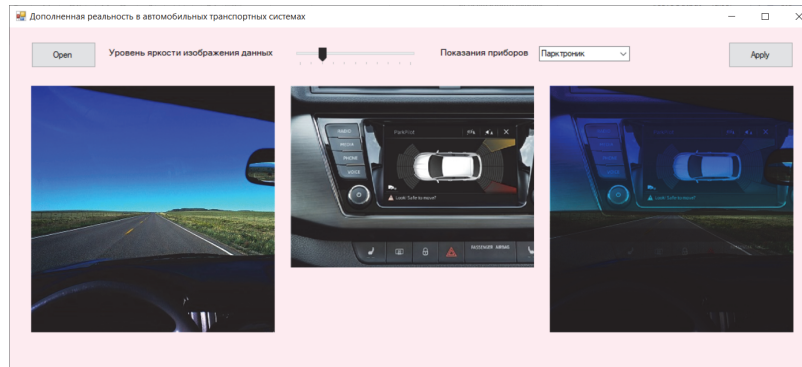
Также реализована функция переключения каналов информации для отображения данных от различных устройств (рис. 2).

Основным достоинством разработанной программы является возможность адаптивной настройки параметров изображения в зависимости от условий окружающей среды и особенностей зрительного восприятия водителя транспортного средства.

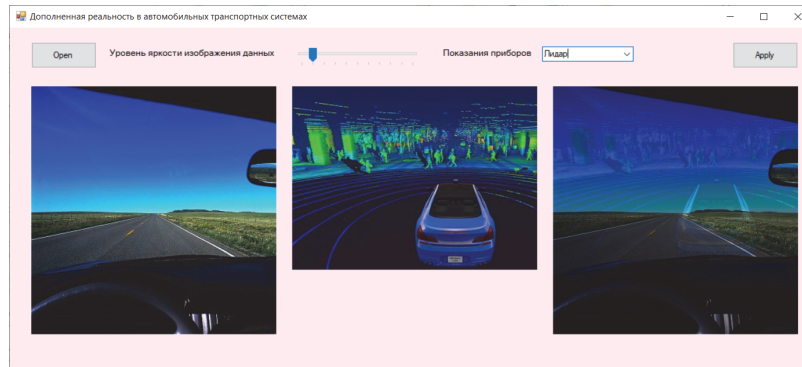
Программа отображения в дополненной реальности данных сенсоров интеллектуальной системы автомобиля позволяет улучшить процесс и качество вождения, способствует концентрации внимания водителя на дорожной ситуации, обеспечивает повышение безопасности дорожного движения, адекватное управление транспортным средством в случае нештатной ситуации.



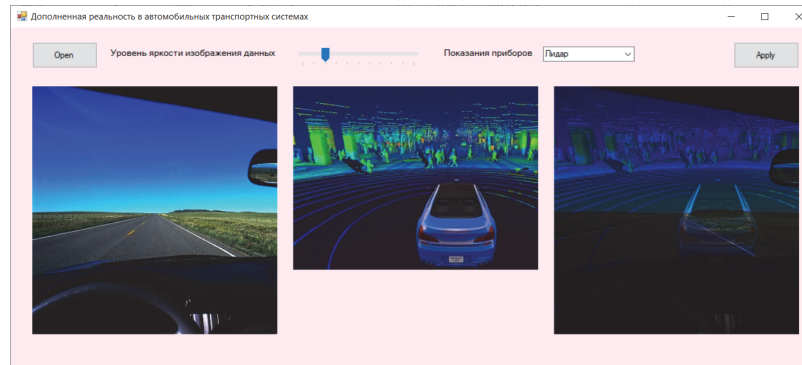
a



б



в



г

Рис. 2. Изображение лобового стекла, изображение показаний прибора, изображение показаний прибора на лобовом стекле при разных значениях уровня яркости изображения показаний прибора: парктроника (а, б), лидара (в, г)
Figure 2. The image of the windshield, the image of the instrument readings, the image of the instrument readings on the windshield at different values of the brightness level of the image of the instrument readings: parking sensors (a, б), lidar (в, г)

Заключение

Технологии дополненной реальности применяются в процессе изготовления и эксплуатации транспортных средств. Основой интеллектуальной системы управления автомобилем является комплекс датчиков, контроллеров, микропроцессорных устройств.

На основе представлений о функционировании интеллектуальной системы управления автомобильным транспортным средством разработана программа для отображения различной информации от сенсоров автомобиля, моделирующая работу системы дополненной реальности. В основе ее алгоритма лежит процесс объединения изображения, видимого через лобовое стекло автомобиля, и данных, поступающих от элементов интеллектуальной системы автомобиля.

Представлены изображения виртуальной реальности, моделирующие различные условия освещения лобового стекла автомобиля, и изображения данных, получаемых от различных сенсорных устройств и систем транспортного средства.

Программа отображения в дополненной реальности данных от элементов интеллектуальной системы управления автомобилем позволяет получать актуальную информацию о процессе движения и параметрах окружения транспортного средства, способствует улучшению вождения, повышению безопасности дорожного движения, обеспечивает адекватное управление транспортным средством в различных условиях, в том числе экстремальных.

Список литературы / References

1. Dini G, Mura MD. Application of augmented reality techniques in through-life engineering services. *Procedia CIRP*. 2015;38:14–23. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.044>
2. Daponte P, De Vito L, Picariello F, Riccio M. State of the art and future developments of the augmented reality for measurement applications. *Measurement*. 2014;57:53–70. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.07.009>
3. Milgram P, Kishino F. A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 1994;E77-D:1321–1329.
4. Jetter J, Eimecke J, Rese A. Augmented reality tools for industrial applications: what are potential key performance indicators and who benefits? *Computers in Human Behavior*. 2018;87:18–33. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.04.054>

5. Martinetti A, Marques H, Singh S, Dongen L. Reflections on the limited pervasiveness of augmented reality in industrial sectors. *Applied Sciences*. 2019;9:3382. <https://doi.org/10.3390/APP9163382>
6. Cardoso LF, Mariano FC, Zorzal ER. A survey of industrial augmented reality. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;139:106159. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106159>
7. Masood T, Egger J. Augmented reality in support of Industry 4.0 – implementation challenges and success factors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019;58:181–195. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.02.003>
8. Egger J, Masood T. Augmented reality in support of intelligent manufacturing – a systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;140:106195. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106195>
9. Gattullo M, Scurati GW, Fiorentino M, Uva AE, Ferrise F, Bordegoni M. Towards augmented reality manuals for industry 4.0: a methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019;56:276–286. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.001>
10. Arnaldi B, Guitton P, Moreau G. *Virtual reality and augmented reality: myths and realities*. Hoboken: ISTE Ltd, John Wiley & Sons; 2018.
11. Lima JP, Roberto R, Simoes F, Almeida M, Figueiredo L, Teixeira JM, Teichrieb V. Markerless tracking system for augmented reality in the automotive industry. *Expert Systems with Applications*. 2017;82:100–114. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.03.060>
12. Gay-Bellile V, Bourgeois S, Tamaazousti M, Naudet-Collette S, Knodel S. A mobile markerless augmented reality system for the automotive field. *Proceedings of the IEEE ISMAR 2012 Workshop on Tracking Methods and Applications, Atlanta, GA, USA, 5–8 November 2012*. Atlanta; 2012.
13. Halim AZ. Applications of augmented reality for inspection and maintenance process in automotive industry. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2018;10:412–421.
14. Lundquist C, Schön T. *Estimation of the free space in front of a moving vehicle*. SAE Technical Paper. 2009-01-1288. <https://doi.org/10.4271/2009-01-1288>
15. Zhenhai G, Bing W. *An adaptive PID controller with neural network self tuning for vehicle lane keeping system*. SAE Technical Paper. 2009-01-1482. <https://doi.org/10.4271/2009-01-1482>
16. Li J, Yang X, Wang ZH, Miao H. Research of three anti-lock braking control algorithms to enhance the effect of vehicle directional stability. *Applied Mechanics & Materials*. 2014;742:618–624. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.742.618>

17. Jin H, Li Sh. Research on stability control based on the wheel speed difference for the AT vehicles. *Discrete Dynamics in Nature & Society*. 2015;2015:251207. <https://doi.org/10.1155/2015/251207>

18. Surkova NE, Ostroukh AV, Eremina TI. *Professional information systems and databases: guidelines*

for laboratory work. Krasnoyarsk: Science and Innovation Center Publishing House. 2015. (In Russ.) <https://lib.madi.ru/fel/fel1/fel16M490.pdf>

Суркова Н.Е., Остроух А.В., Еремина Т.И. Профессиональные информационные системы и базы данных. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2015. 49 с.

Сведения об авторах

Круглова Лариса Владимировна, кандидат технических наук, доцент департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8824-1241, eLIBRARY SPIN-код: 2920-9463; kruglova-lv@rudn.ru

Сусей Фафа К., магистрант, департамент механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-6762-9231; 1032199266@rudn.ru

About the authors

Larisa V. Kruglova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8824-1241, eLIBRARY SPIN-code: 2920-9463; kruglova-lv@rudn.ru

Fafa K. Ceesay, master student, Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6762-9231; 1032199266@rudn.ru




DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-165-173
УДК 553.6

Научная статья / Research article

Целесообразность попутной добычи фосфоритов и глауконитов при разработке титан-цирконовых россыпей месторождения Центральное

А.Ф. Георгиевский  , В.М. Бугина 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 geo.gaf@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 15 февраля 2022 г.

Доработана: 23 апреля 2022 г.

Принята к публикации: 12 мая 2022 г.

Ключевые слова:

фосфоритная мука, фосмелиоранты, рудные пески, обогащение, технологические пробы, выход, извлечение, фосфориты, гранулометрические классы, глаукониты

Аннотация. С целью максимально полного использования россыпного месторождения Центральное в Тамбовской области проведено изучение технологических проб из вскрышных пород и хвостов обогащения титан-цирконовых руд, в которых в виде примеси присутствуют рассеянные полезные фосфоритовые и глауконитовые минералы. Пробы весом по 300 кг подвергались мокрому и сухому грохочению, самоизмельчению, гравитационному разделению, а также магнитной сепарации. Выделенные фосфатные и глауконитовые фракции и их концентраты исследовались с помощью обычной и электронной микроскопии, изучались методами рентгеновского, химического и количественного спектрального анализа. В результате получены детальные данные по вещественно-структурным особенностям минералов, их взаимоотношениям и обогатительным характеристикам. Это в свою очередь позволило наметить возможные направления дополнительного использования руд месторождения Центральное в виде попутно получаемых из них фосфоритовых и глауконитовых концентратов. Для их агрохимической оценки поставлены вегетационные опыты, показавшие высокую эффективность наработанных концентратов, применение которых в сельском хозяйстве в форме минеральных удобрений и мелиоранта ведет к увеличению растительной массы зерновых культур на 25–26 %. Поскольку запасы фосфатов и глауконитов оцениваются в 17 и 6 млн т соответственно, в случае освоения месторождения появляются дополнительные резервы, способные существенно снизить себестоимость строительства горнодобывающего предприятия.

Для цитирования


Георгиевский А.Ф., Бугина В.М. Целесообразность попутной добычи фосфоритов и глауконитов при разработке титан-цирконовых россыпей месторождения Центральное // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 165–173. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-165-173>



The rational for associated mining of phosphorites and glauconites in the development of titanium-zircon placers at the Tsentral'noye deposit

Alexey F. Georgievskiy  , Viktoriya M. Bugina 

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

 geo.gaf@yandex.ru

Article history

Received: February 15, 2022

Revised: April 23, 2022

Accepted: May 12, 2022

Keywords:

phosphorite meal, phosphate flour, phosphoric ameliorants, ore sands, enrichment, technological samples, output, extraction, phosphorites, granulometric classes, glauconites

Abstract. In order to maximize the use of the Tsentral'noye placer deposit in the Tambov region, a study was made of technological samples from overburden rocks and concentration tailings of titanium and zirconium ores, in which dispersed useful phosphorite and glauconite minerals are present as an impurity. Samples weighing 300 kg were subjected to wet and dry screening, self-grinding, gravitational separation, and magnetic separation. The isolated phosphate and glauconite fractions and their concentrates were studied using polarizing and electron microscopy, X-ray, chemical, and quantitative spectral analyse. As a result, detailed data on the material and structural features of minerals, their relationships and enrichment characteristics were obtained. This, in turn, made it possible to outline possible directions for the additional use of the ores of the Tsentral'noye deposit in the form of phosphorite and glauconite concentrates obtained from them. For their agro-chemical evaluation, vegetative experiments were carried out, which showed the high efficiency of the accumulated concentrates, which in agriculture in the form of mineral fertilizers of the ameliorant leads to an increase in the plant mass of grain crops by 25–26 %. Since the reserves of phosphates and glauconites are estimated at 17 and 6 million tons respectively, if the deposit is developed, additional reserves appear that can significantly reduce the cost of building a mining enterprise.

For citation

Georgievskiy AF, Bugina VM. The rational for associated mining of phosphorites and glauconites in the development of titanium-zircon placers at the Tsentral'noye deposit. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):165–173. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-165-173>

Введение

После распада Советского Союза в России возник острый дефицит в титановом сырье. Его потребности покрываются за счет поставок титановых концентратов с территории Украины. Вместе с тем Россия обладает собственными минеральными ресурсами, по запасам и качеству не уступающими ведущим странам мира (Китай, Бразилия, ЮАР). Руды образуют как коренные, так и россыпные месторождения, в том числе расположенные в экономически освоенных регионах. Примером является древняя морская россыпь Центрального месторождения в Рассказовском районе Тамбовской области. По составу она комплексная. Кроме ильменита, рутила и циркона, рудные пески включают также фосфаты и глаукониты. Месторождение открыто в середине прош-

лого века и после геологоразведочных работ отнесено к десятку наиболее крупных мировых объектов россыпных титановых руд. Несмотря на это в течение многих лет оно оставалось консервированным, поскольку в Советском Союзе на Украине уже действовали несколько горнодобычных комбинатов, которые удовлетворяли спрос на титановые продукты. На современном этапе неоднократно ставился вопрос о необходимости освоения Центрального месторождения. Особенно активно эта тема обсуждается сегодня, поскольку на федеральном уровне принято решение о целесообразности его отработки. Однако в условиях современного рынка реализация этого решения является крайне сложной задачей. Важное значение приобретают факторы, способные улучшить экономические показатели по перера-

ботке рудных песков. К таким факторам относятся попутная добыча и использование фосфоритов и глауконитов, заключенных в титан-циркониевых рудах и в породах их «вскрыши». *Цель работы* – показать возможности обогащения и практического использования глауконитовых и фосфоритовых продуктов, попутно добываемых при разработке титан-циркониевых руд Центрального месторождения.

1. Методы и материалы

Фактическим материалом для исследований послужили данные изучения двух технологических проб весом по 300 кг. Одна из них (№ 51; 3,7 % P_2O_5) характеризует верхний, а вторая (№ 53; 0,98 % P_2O_5) нижний фосфоритоносные горизонты. Изучение пробы № 53 выполнено на технологических продуктах, оставшихся в отвальных хвостах титан-циркониевых песков после их обогащения.

Для изучения проб проводился гранулометрический рассев материала, с последующим разделением его с помощью центрифужного анализа на составные части. Полученные фракции исследовались обычной и электронной микроскопией, рентгеновским, химическим и количественным спектральным анализами. Для этих целей использовались следующие приборы: оптический микроскоп ПОЛАМ Л213М, стереоскопический микроскоп С13, дифрактометр ДРОН-4, спектрометр ЛИЭС, электронный микроскоп ЭМВ-100АК, сепаратор СИМ-1, грохот типа ГИСЛ-62А, шаровая мельница МШР, классификатор типа КСН-1.5, магнитный сепаратор типа 6ЭРМ-35/315, гидроциклон типа ГЦ-500. Анализы выполнялись в лабораториях ГИГХС, РУДН, РГГРУ.

2. Результаты и обсуждение

Месторождение Центральное локализуется в 2–20 м от дневной поверхности среди горизонтально залегающих верхнемеловых песков. Фосфориты и глаукониты являются попутными компонентами титан-циркониевых руд и образуют два соприкасающихся горизонта, разделенных поверхностью размыва. Нижний сеноманский горизонт приурочен к кровле рудного пласта. Непосредственно перекрывающий его верхний сантонский горизонт вместе с четвертичными отложениями относится к вскрышным породам. Мощность каждого из них в среднем равна 1 м.

В обоих случаях глауконит и фосфориты представлены рассеянными в песках зернами и конкрециями [1–7]. Суммарные запасы фосфоритов оценены по категории C_2 и составляют 17 млн т фосфоритового концентрата со средним содержанием 14,3 % P_2O_5 . Ориентировочные запасы глауконитового концентрата оцениваются в 6 млн т¹ [8].

Руды обоих горизонтов представляют собой рыхлые светлоокрашенные кварцевые пески с характерными блесками слюды, точечной вкрапленностью глауконита и разрозненными фосфоритовыми стяжениями разного размера. В целом сантонские пески, в отличие от нижнего горизонта, более тонкие, с существенной примесью связывающего глинисто-цеолитового вещества (12,9 %), глауконитовые (13 %) и слюдистые (7 %). Кроме того, в них больше фосфоритов (12 %), обладающих более высоким качеством (22,4 % P_2O_5).

Пески нижнего (сеноманского) горизонта кварцевые (83 %), обеднены фосфатами (3 %; 9–15 % P_2O_5), глауконитом (4,6 %) и слюдами, но обогащены тяжелыми минералами (4 %). Содержание полевых шпатов, как и в верхнем горизонте, составляет 4 %.

Руды-пески состоят из (80–90 %) тонких классов (–0,25 мм). Основная масса фосфатных образований связана с крупными классами (> 2 мм), где сосредоточено 60–70 % извлекаемого P_2O_5 . Заметное количество фосфатов концентрируется также в классе –0,15+0,1 мм и –0,04 мм. Однако низкие содержания полезного компонента (1–2 % P_2O_5) делают такие классы не перспективными для практических целей. Таким образом, на Центральном месторождении фосфат наблюдается в форме доминирующего крупнокускового материала и подчиненных зерен псаммитовой размерности. Крупный фосфоритовый материал состоит из непереотложенных и перемытых конкреций-желваков, мелкой гальки и остатков органической природы. Непереотложенные желваки характерны для фосфоритового сантонского горизонта, а разнообразный перемытый материал – для сеноманского уровня.

Общее содержание P_2O_5 в рудах определяют фосфоритовые желваки – конкреции. Морфоло-

¹ Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Тамбовской области на 01.01.2018 г. СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2018; Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016–2017 годах». М.: ФГБУ ВИМС; Минерал-Инфо, 2018. 370 с.

гия их различна, но преобладают неправильно изометричные стяжения размером 5–8 см. Более крупные из них имеют причудливую конфигурацию с характерными выступами и наростами. Конкреции меньшего размера – со следами окатывания. Обычно они покрыты желтовато-серым налетом порошкообразного фосфата, зачастую маскирующего природную коричневую окраску. Макроскопически конкреции шероховатые, крепкие, плотные, состоят из желвачков, которые неоднократно цементировались фосфатом поздних генераций. Последний на сколе и в шлифах устанавливаются по чередованию темных и светлых участков с резко различными структурно-текстурными особенностями. Внутри конкреций встречаются слепки мелких пеллеципод, а на поверхности – отверстия от камнеточцев. Также нередко извилистые ходы илоедов, заполненные тонкозернистым песком. Часть ходов по стенкам инкрустированы иголочками цеолитов. Отдельные стяжения (10–15 %), особенно вымытые из сеноманских отложений, выветрены. Они имеют белую окраску, мучнистый излом и распадаются при легком сжатии.

В шлифах конкреции сложены изотропным фосфатом, который цементирует глауконит-кварцевый материал. Последний концентрируется пятнами, полосами, разрозненными включениями. Иногда они окружены раскристаллизованными тонкими фосфатными оторочками. В целом характерен базальный тип цемента с устойчивым преобладанием фосфата над терригенным кварцем, так что количество P_2O_5 в стяжениях достигает 20–25 %. Это существенно отличает сантонские образования от сеноманских фосфоритов, часто низкокачественных, с массовой долей P_2O_5 , равной 9–15 %. Из других примесей в фосфоритах присутствуют глауконит (1–5 %), полевой шпат (1–2 %), редкие зерна тяжелых минералов. Также отмечаются обломки микрокварцитов, гнезда глинистого вещества и органические остатки. Последние развиты незначительно, но после фосфатных стяжений, образуют второй морфологический тип обособлений фосфата в рудах Центрального месторождения. Различаются макро- и микроостатки. Первые накапливаются в классе +7 мм. Среди них диагностируются ядра раковин гастропод и пеллеципод, фрагменты фосфатизированных губок. Иногда сохраняются целые кубки губок размером 15–20 см. Фосфатные микроостатки представлены копролитами,

псевдоморфозами по фораминиферам, радиоляриям и спикулам губок; встречаются также обломки костей рыб. В отличие от крупных классов, где остатки организмов не имеют практического значения, в песках на них приходится основной объем фосфатов. Наиболее обычны копролиты размером 0,04–0,25 мм. Форма копролитов сферическая, чечевицепоподобная или в виде укороченных палочек. Окраска различная: от черной и синей до белой и желтой; поверхность матовая, гладкая либо шероховатая; многие из них имеют стекловатый облик. Сложены копролиты изотропным фосфатом, нередко перекристаллизованным до апатита. Таким образом, устанавливается четыре модификации фосфата: изотропный скрытокристаллический, кристаллический радиально-лучистый, кристаллический апатитоподобный, изотропный порошковидный гипергенной природы. *Изотропный фосфат* слагает большую часть всех фосфатных образований. Средний показатель преломления 1,559–1,605; удельный вес 2,85 г/см³. *Радиально-лучистый фосфат* образует каемки (0,01–0,02 мм) вокруг различных неоднородностей в фосфоритовых конкрециях. Показатель преломления минерала 1,603–1,605; двупреломление – 0,005–0,007; удельный вес 2,85 г/см³. Другие параметры двух отмеченных разновидностей фосфата: «а» = 9,323–9,334 Å; «с» = 6,899–6,896 Å; $CO_2/P_2O_5 = 0,155–0,176$; $F/P_2O_5 = 0,094–0,11$; содержание P_2O_5 в обогащенных фракциях – 29,2–32,35 %. По данным [9–13], приведенные показатели характерны для минерала курскита. *Изотропный порошковидный фосфат* образует налеты на конкрециях, а также отмечается среди пелитового материала класса –0,04 мм. Дисперсные размеры частиц, их срастания с другими минералами не позволяют выполнить корректно замеры величины показателя преломления и определить рентгеноструктурные параметры вещества. Однако фосфатная природа частиц доказывается реакцией с раствором молибденовокислого аммония. *Апатитоподобный фосфат* – последняя установленная в рудах модификация фосфатного минерала. Он довольно широко представлен в песках во фракции удельного веса 2,8–3,0 г/см³, где слагает песчинки, копролиты и другие мелкие органические остатки. В иммерсионных препаратах наблюдаются переходы от фосфатных зерен, изотропных и частично перекристаллизованных, до превращенных в монокристаллы апатита, целиком угасающих при вра-

щении столика микроскопа. Одновременно фосфатные частички становятся полупрозрачными, а их окраска изменяется до голубой и синей. Попутно с апатитовыми зёрнами обнаружены пластинки и кристаллики фиолетового флюорита. Такая минеральная ассоциация свидетельствует о перекристаллизации изотропного фосфата во фторапатит, сопровождающейся частичной потерей фтора. Последний после незначительной миграции кристаллизовался в виде флюорита. Данные кристаллооптического и рентгеноструктурного анализов подтверждают апатитовую природу минерала. Его показатель преломления – 1,623–1,627; параметры элементарной ячейки: «а» = 9,349–9,37 Å; «с» = 6,868–6,896 Å. В [10; 14] показано, что переход курскита во фторапатит достигается при глубоком катагенезе и метаморфизме. Геологическая позиция Центрального месторождения, слабо литифицированная (сыпучая) консистенция песков, вмещающих фосфориты, не позволяет связывать перекристаллизацию курскита с катагенетическими процессами. Очевидно, существуют и другие факторы, вызывающих трансформацию фосфатных минералов. Можно предположить агрессивное воздействие на пески древних гипергенных растворов, следы которых фиксируются в рудах в виде выветрелых фосфоритовых образований, измененных полевых шпатов и слюд. Вероятно, под воздействием таких растворов часть фосфатного вещества переотлагалась в форме налетов порошкообразного фосфата. Другая часть испытала структурную перестройку с переходом в апатит. Способность гипергенных растворов изменять структуру фосфатных минералов показана в [15; 16].

Обогатительная способность руд зависит от их физического состояния, вещественных, структурно-текстурных и минералого-петрографических особенностей [10–12]. Фосфоритовые руды Центрального месторождения представлены рыхлыми песками с рассеянными плотными фосфоритовыми образованиями. Как показали гранулометрические исследования и распределение пятиокси фосфора по фракциям, богатый фосфатом материал концентрируется в крупных классах. Такие особенности руд делают эффективной в качестве первой технологической операции отсев бедных фосфатами тонких классов. Анализ возможных вариантов отсева показал, что оптимальным является рассев руды по классу +0,5 мм для верхнего и +2,0 для нижнего фосфоритовых

горизонтов. Эти варианты максимально удовлетворяют по полноте извлечения фосфатов, сохраняя при этом качество концентратов на уровне продуктов, применимых в народном хозяйстве. При организации рассевов в промышленных масштабах важной практической задачей является оценка технологичности грохочения без привлечения промывки руды. С этой целью поставлены опыты по ситовке руд верхнего горизонта «сухим» и «мокрым» способами. При сухом расसेве происходит резкое падение качества концентрата и других параметров обогащения. Причины кроются в высоком содержании в составе пробы дисперсных глинистых и цеолитовых минералов. Их наличие на поверхности фосфоритового материала ведет к «огрубению» гранулометрического состава и резкому загрязнению отсеянных концентратов не фосфатными примесями. Таким образом, обязательным условием обогащения фосфоритов Центрального месторождения является промывка руды. Мытые фосфоритовые концентраты состоят из конкреций и обломков песчаников, количество которых оценивается от 21 (проба № 51) до 30 % (проба № 53). Учитывая значительную разницу в прочностных свойствах фосфоритов и песчаников, для дальнейшего обогащения концентратов были проведены опыты по избирательному разрушению песчаников в условиях самоизмельчения руды с последующим отсевом ее мелких классов. Тридцатиминутная окатка руд приводит к разрушению песчаников, в результате чего в концентратах после отсева мелких классов содержание пятиокси фосфора повышается на 3 %. Однако положительный эффект от такой технологической операции нивелируется потерями в извлечении фосфата, которые достигают 51 %. Для получения фосфатных продуктов, пригодных для производства растворимых удобрений, требуется очистка концентратов от разубоживающих примесей, заключенных внутри фосфоритовых конкреций. Достигнув этого можно только после их разрушения и раскрытия нефосфатных минералов. Первостепенную технологическую важность здесь приобретает тонина дробления концентрата и способность отмеченных минералов обособляться в самостоятельных зёрнах. По данным изучения шлифов, минимальное количество сrostков будет формироваться при тонине помола 0,1 мм, что определяется размером в конкрециях минеральных вкраплений. Степень раскрытия мине-

ралов и способность фосфоритов к глубокому обогащению оценивается гравитационным разделением дробленного материала при центрифугировании его в тяжелых жидкостях. Проведенные опыты показали, что фосфат присутствует во всех фракциях, но наиболее богат им материал плотностью $-3,0+2,85 \text{ г/см}^3$ (23–25 % P_2O_5). Однако и здесь не удается достигнуть удовлетворительной очистки фосфата, поскольку он на 25–30 % загрязнен посторонними примесями в виде фосфатных сростков с глауконитом и кварцем. Вместе с тем проведенные исследования показывают, что получить высококачественные фосфатные продукты на уровне 28–29 % P_2O_5 возможно, но для этого в исходном сырье содержание пятиоксида фосфора должно быть не менее 21–22 %. При ориентации на такое сырье в переработку будут вовлекаться лишь 50 % извлекаемых фосфатов одного только верхнего фосфоритового горизонта, поэтому практическая реализация такого варианта маловероятна. В связи с этим

важно оценить возможность использования в народном хозяйстве непосредственно самих мытых фосфоритовых концентратов.

Поскольку фосфоритовые концентраты Центрального месторождения не пригодны для получения растворимых удобрений, то целесообразно изучить возможность их использования в качестве фосфоритной муки. Как известно, на кислых почвах такое удобрение соперничает по эффективности с суперфосфатом. Учитывая это, проведены опыты по получению фосмуки обычного (0,18 мм) и тонкого (0,1 мм) помола. Исследования велись с использованием шаровой мельницы типа роальганг. Как видно из таблицы фосфоритная мука обычного и тонкого помола Центрального месторождения по содержанию лимонно-растворимой P_2O_5 не уступает концентратам разрабатываемого Верхнекамского месторождения (таблица). Следовательно, она может быть использована в качестве минерального удобрения.

Сравнительная характеристика технологических продуктов Центрального и Верхнекамского месторождений

Месторождение	Вид фосмуки	Содержание, %	
		P_2O_5 (общая)	P_2O_5 (лимонно-растворимая)
Центральное (проба № 51)	Стандартная	20,13	7,3
	Тонкая	20,13	7,5
Центральное (проба № 53)	Стандартная	14,3	6,95
	Тонкая	14,3	7,1
Верхнекамское [10]	Стандартная	22,5	6,2
	Тонкая	22,5	6,5

Comparative characteristics of technological products of the Tsentral'noye and Verkhnekamskoye deposits

Deposit	Phosphate meal category	Phosphorus dioxide content, %	
		P_2O_5 (total)	P_2O_5 (citrate-soluble)
Tsentral'noye deposit (sample No 51)	Standart	20.13	7.3
	Fine	20.13	7.5
Tsentral'noye deposit (sample No 53)	Standart	14.3	6.95
	Fine	14.3	7.1
Verhne-Kamskoe deposit [10]	Standart	22.5	6.2
	Fine	22.5	6.5

Что касается второго полезного компонента – глауконита, он наблюдается во всех гранулометрических классах в форме различных зерен, псевдоморфоз и микроконкреций размером 0,01–0,5 мм, чаще 0,07–0,15 мм в диаметре. Устанавливаются две генерации, отличающихся по плотностным свойствам, магнитной восприимчивости, а также морфогенетическим признакам. *Глауконит с плотностью 2,75–2,85 г/см³* концентрируется в рудах

нижнего горизонта. Представлен окатанными изометричными зернами и их обломками темно-зеленого, практически черного цвета, с глянцевидной поверхностью. В шлифах зерна буровато-зеленые с резко выраженным микроагрегатным погасанием. Минерал накапливается на электромагнитном сепараторе при силе тока 0,2А. По соотношению Fe и Al он относится к железистой разновидности ($\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3 = 2,1$). По ре-

зультатам рентгеноструктурных исследований представляет собой высоко железистую гидрослюда политипа 1M, содержащую 5 % монтмориллонитовых пакетов. Глауконит с плотностью $2,6-2,75 \text{ г/см}^3$ типичен для верхнего фосфоритового горизонта. Наблюдается чаще всего в форме светлоокрашенных микроконкреций и псевдоморфоз по чешуйкам слюд. Микроконкреции имеют неправильно изометричную форму, гроздевидное строение. В шлифах характеризуется «лапчатой» конфигурацией и отчетливой агрегатной поляризацией. При взаимодействии с электромагнитными полями минерал сепарируется при силе тока 0,3–0,4А. По соотношению оксидов Fe и Al он рассматривается в качестве маложелезистой разновидности глауконита ($\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{Al}_2\text{O}_3 = 0,8$). По данным рентгеноструктурного анализа – это смешаннослойное слюдамонтмориллонитовое образование с упорядоченной структурой политипа 1M, с 25–30 % набухающих слоев. С целью выяснения предельно возможных показателей сепарации на обесшламленных продуктах проведены опыты выделения глауконита из песков с использованием высокопроизводительного сепаратора «Боксмаг-Рапид» (Англия). Полученные результаты показывают, что выделенные магнитные фракции практически целиком сложены глауконитом. Из бедных глауконитом песков пробы № 53 в магнитную фракцию переходят только 20–27 % глауконита. Напротив, для пробы № 51 с повышенным содержанием минерала данный параметр не опускается ниже 80 %. Таким образом, перспективными для получения высококачественных глауконитовых концентратов являются пески верхнего горизонта, в то время как «хвосты» от промывки рудных песков нижнего горизонта для этих целей мало пригодны.

Результаты агрохимической оценки фосфоритной муки верхнего и калийного глауконит-фосфорного мелиоранта нижнего горизонтов. Исследования агрохимических свойств проводились в ходе вегетационных опытов с овсом на кислой (рН-4) серой лесной почве с низким содержанием подвижного фосфора (2,5 мг P_2O_5 на 100 г почвы). Данные продукты применялись в качестве удобрений в виде порошка с размером частиц –0,18 мм. Полученные результаты свидетельствуют, что под влиянием внесенных в почву продуктов происходило заметное улуч-

шение условий фосфатно-калийного питания овса и интенсивный рост вегетативной массы растений (25 % – проба № 51; 26 % – проба № 53).

Заключение

Для выяснения возможности безотходной отработки Центрального месторождения изучен вещественный состав, обогатимость и пути использования фосфоритов и глауконитов технологических проб № 51 и 53, характеризующих природные и техногенные руды рыхлых песков верхнего и нижнего фосфоритовых горизонтов. Руду верхнего горизонта, в отличие от нижнего, характеризует повышенное количество крупнокускового материала, более тонкий алевритопелитовый состав песчаной основной массы, обильная примесь глинисто-цеолитового вещества, пониженное содержание тяжелых минералов, увеличенная доля глауконита и лучшие качественные показатели фосфоритов. Основная масса фосфоритов накапливается среди крупнокускового материала в виде конкреционных стяжений, которые принято рассматривать в качестве фосфоритов желвакового типа. Другая (большая) часть фосфатов приурочена к песчаным гранулометрическим классам, где наблюдаются в форме фосфатизированных зерен копролитовой природы. Пески многокомпонентны и наряду с отмеченными минералами включают в себя цеолиты, монтмориллонит, мусковит, полевые шпаты.

Содержание пятиоксида фосфора в концентратах зависит от количества присутствующих в их составе обломков песчаников и от качества желваков. Этими двумя показателями объясняются резкие качественные различия концентратов руд нижнего (13 % P_2O_5) и верхнего (18–20 % P_2O_5) горизонтов. Существует принципиальная возможность улучшения параметров концентратов за счет разрушения песчаников в ходе технологической «окатки» материала. Однако получаемые от данных операций результаты сводятся на нет из-за значительных потерь в извлечении P_2O_5 . По основным параметрам рассматриваемые концентраты могут быть использованы как фосфорные удобрения в форме фосфоритной муки (проба № 51) и ее низкокачественных заменителей – фосмелиорантов (проба № 53). Проведен-

ными вегетационными опытами доказаны высокие агрохимические возможности тонкоизмельченной и обычной фосфоритной муки, а также фосмелиорантов. Получение глауконитов из хвостов обогащения возможно электромагнитной сепарацией после отсева пылевидных фракций. В результате обогащения выделены два концентрата с содержанием 87 и 62 % глауконита, которые характеризуют пески верхнего и нижнего горизонтов соответственно. В обоих случаях извлечение минерала невысокое. Хотя, как показали лабораторные опыты, резервы для улучшения показателей обогащения имеются. Обогащать нижние пески малоэффективно. Из многих существующих направлений использования глауконита проанализированы возможности применения полученных глауконитовых концентратов в качестве бесхлорного калийного удобрения. Выполненные вегетационные испытания показали высокую эффективность концентратов в роли такого удобрения.

Список литературы

1. Патык-Кара Н.Г., Гореликова Н.В., Бардеева Е.Г. К истории формирования титано-циркониевых песков месторождения Центральное в европейской части России // *Литология и полезные ископаемые*. 2004. № 6. С. 585–601.
2. Иконников Н.Н. Россыпные продуктивные формации осадочного чехла Русской платформы // VIII Съезд по геологии россыпей. Киев: ИГФМ АН СССР, 1987. С. 249–250.
3. Россыпные месторождения России и других стран СНГ / под ред. Н.П. Лаверова, Н.Г. Патык-Кара. М.: Научный мир, 1997. 454 с.
4. Патык-Кара Н.Г., Левченко Е.Н., Стехин А.И., Барсегян В.В., Бочнева А.А., Чижова И.А., Андрианова Е.А., Дубинчук В.Т. Минеральные ассоциации титано-циркониевых песков месторождения Центральное (Восточно-Европейская платформа) // *Геология рудных месторождений*. 2008. № 3. С. 246–270.
5. Савко А.Д., Беляев В.И., Иконников Н.Н., Иванов Д.А. Титан-циркониевые россыпи Центрально-Черноземного района. Воронеж: ВГУ, 1995. 147 с.
6. Савко А.Д., Дмитриев Д.А., Куропан С.А., Калаев В.Н., Шевырев Л.Т., Иванов Д.А., Девятова Т.А. Основы оптимального использования минерально-сырьевой базы Центрально-Черноземного района. Воронеж: ВГУ, 2018. 92 с.
7. Лаломов А.В., Ремизова Л.И. Основные направления создания импортнезависимой титановой и цир-

кониевой промышленности России // *Материалы XV Международного совещания по геологии россыпей и месторождений кор выветривания*, 24–28 августа 2015 г. Пермь: ПГНИУ, 2015. С. 129–131.

8. Лаломов А.В., Бочнева А.А. Центральное, Лукояновское и Унечское месторождения цирконий-титановых песков как база для создания минерально-сырьевого центра и осуществления стратегии импортозамещения России // *Молодой ученый*. 2020. № 2. С. 333–341.

9. Бушинский Г.И. Литология меловых отложений Днепровско-Донецкой впадины. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 307 с.

10. Блисковский В.З. Вещественный состав и обогатимость фосфоритовых руд. М.: Недра, 1983. 199 с.

11. Соколов А.С. Основные проблемы фосфатной геологии. Проблемы геологии фосфоритов. М.: Наука, 1991. 184 с.

12. Смирнов А.И. Вещественный состав и условия формирования основных типов фосфоритов. М.: Недра, 1972. 194 с.

13. Блисковский В.З., Минеев Л.А. Камни плодородия. М.: Недра, 1986. 213 с.

14. Красильникова Н.А. О флюорите в фосфоритах // *Литология и полезные ископаемые*. 1963. № 3. С. 141–144.

15. Георгиевский А.Ф. Карстовые фосфориты Юго-Восточных Саян. Современные инженерные технологии. М.: РУДН, 2004. С. 65–67.

16. Бугина В.М., Юдович Я.Э., Кемрис М.П. Литохимическая характеристика отложений карстовой фосфоритовой залежи Харанурского месторождения (Юго-Восточные Саяны) // *Вестник Института геологии Коми РАН*. 2016. № 8. С. 33–37.

References

1. Patyk-Kara NG, Gorelikova NV, Bardeeva EG. History of the formation of the Tsentral'noe titanium-zirconium sand deposit in the European part of Russia. *Lithology and Mineral Resources*. 2004;(6):585–601. (In Russ.)
2. Ikonnikov NN. *The productive placer formations of the Russian platform mantle*. Kiev: IGFM of the USSR Academy of Sciences; 1987. p. 249–250. (In Russ.)
3. Laverova NP, Patyk-Kara NG. *Placer deposits of Russia and other CIS countries*. Moscow: Nauchnyj Mir Publ.; 1997. (In Russ.)
4. Patyk-Kara NG, Bochneva AA, Chizhova IA, Andrianova EA, Levchenko EN, Stekhin AI, Barssegyan VV, Dubinchuk VT. Mineral assemblages of titanium-zirconium sands at the Central deposit, the east European platform. *Geology of Ore Deposits*. 2008;(3):246–270. (In Russ.)
5. Savko AD, Belyaev VI, Ikonnikov NN, Ivanov DA. *Placers of Titanium and Zirconium in Central Black Earth Region*. Voronezh: Voronezh State University; 1995. (In Russ.)

6. Savko AD, Dmitriev DA, Kurolap SA, Kalaev VN, Shevyrev LT, Ivanov DA, Devyatova TA. *Principles of the efficient mineral resource base using of the Central Black Earth region*. Voronezh: Voronezh State University; 2018. (In Russ.)

7. Lalomov AV, Remizova LI. Main directions of creation of import-independent titanium and zircon mineral resource industry of Russia. *Proceedings of the XV International Meeting on the Geology of Placers and Deposits of Weathering crust, 24–28 August 2015*. Perm: Permian State National Research University; 2015. p. 129–131. (In Russ.)

8. Lalomov AV, Bochneva AA. Tsentralnoye, Lukoyanovskoye and Unechskoye deposits of zirconium-titanium sands as a base for the creation of a mineral resource center and the implementation of the import substitution strategy of Russia. *Young Scientist*. 2020;(2):333–341. (In Russ.)

9. Bushinsky GI. *Lithology of Cretaceous deposits of the Dnieper-Donetsk depression*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1954. (In Russ.)

10. Bliskovsky VZ. *Material composition and enrichability of phosphorite ores*. Moscow: Nedra Publ.; 1983. (In Russ.)

11. Sokolov AS. *The main problems of phosphate geology. Problems of the geology of phosphorites*. Moscow: Nauka Publ.; 1991. (In Russ.)

12. Smirnov AI. *Material composition and conditions for the formation of the main types of phosphorites*. Moscow: Nedra Publ.; 1972. (In Russ.)

13. Bliskovsky VZ, Mineev LA. *Cropping power of stones*. Moscow: Nedra Publ.; 1986. (In Russ.)

14. Krasilnikova NA. About fluorite in phosphorites. *Lithology and Mineral Resources*. 1963;(3):141–144. (In Russ.)

15. Georgievskiy AF. *Karst phosphorites of the South-eastern Sayan Mountains. Modern engineering technologies*. Moscow: RUDN University; 2004. p. 65–67. (In Russ.)

16. Bugina VM, Yudovich YaE, Ketris MP. Lithochemical characteristics of karst phosphorites of Haranurskoe deposit (South-Eastern Sayans). *Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Russian Academy of Sciences*. 2016;(8):33–37. (In Russ.)

Сведения об авторах

Георгиевский Алексей Федорович, доктор геолого-минералогических наук, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-4835-760X, eLIBRARY SPIN-код: 1308-9195; georgievskiy-af@rudn.ru

Бугина Виктория Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-6492-6628, eLIBRARY SPIN-код: 8410-3861; bugina-vm@rudn.ru

About the authors

Alexey F. Georgievskiy, Doctor in Geology and Mineralogy, Associate Professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Business, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4835-760X, eLIBRARY SPIN-code: 1308-9195; georgievskiy-af@rudn.ru

Viktoriya M. Bugina, PhD in Geology and Mineralogy, Associate Professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Business, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6492-6628, eLIBRARY SPIN-code: 8410-3861; bugina-vm@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-2-174-181
УДК 553.98

Научная статья / Research article

Геологическое строение и нефтегазоносность шельфа Республики Экваториальная Гвинея

А.Е. Котельников , Л.М. Ондо Айенвеге 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
✉ kotelnikov-ac@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 9 января 2022 г.
Доработана: 22 февраля 2022 г.
Принята к публикации: 5 марта 2022 г.

Ключевые слова:

Республика Экваториальная Гвинея, геология; нефтегазоносность, месторождение Сейба, месторождение Окуме, месторождение Зафино, Бассейн Рио-Муни, Северо-Габонский бассейн

Аннотация. Изучается нефтегазоносный потенциал Республики Экваториальная Гвинея, в которой доходы от продажи газа и нефти составляют более 90 % национального дохода. Актуальным является увеличение запасов нефти и газа, поэтому задачей исследования стала оценка перспективности обнаружения новых месторождений нефти на основе анализа геологической информации. Нефтегазоносный бассейн Гвинейского залива протягивается узкой прибрежной полосой вдоль западного побережья экваториальной Африки и представлен мощными осадочными толщами. Наиболее значимый бассейн Рио-Муни вмещает мощную перспективную толщу сенонских отложений, перекрытую третичными осадками, мощность которых увеличивается с юга на север. Интервалы пород-коллекторов с хорошими фильтрационно-емкостными свойствами известны как в третичных, так и в меловых отложениях, но промышленная продуктивность до настоящего времени установлена только в меловом комплексе отложений. В пределах бассейна присутствуют перспективные нефтегазоносные области, обладающие антиклинальными зонами нефтегазонакопления, которые связаны с экранированием тектонического, стратиграфического и литологического типа. В южных частях бассейна соленосные отложения залегают неглубоко и представляют интерес для обнаружения нефтяных залежей. Показано, что в бассейне Рио-Муни территории блока К в самой южной части Экваториальной Гвинеи – это перспективный регион с доказанными запасами углеводородов. Палеоценовые и туронские коллекторы состоят из недеформированных склоновых подводных вееров, аналогичных глубоководному бассейну Кампос в Бразилии.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность правительству Республики Экваториальная Гвинея за предоставленные материалы.

Для цитирования


Котельников А.Е., Ондо Айенвеге Л.М. Геологическое строение и нефтегазоносность шельфа Республики Экваториальная Гвинея // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 174–181. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-174-181>



Geological structure and oil and gas content of the shelf of the Republic of Equatorial Guinea

Alexander E. Kotelnikov  , Lazaro M. Ondo Ayenvege 

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

 kotelnikov-ae@rudn.ru

Article history

Received: January 9, 2022

Revised: February 22, 2022

Accepted: March 5, 2022

Keywords:

Republic of Equatorial Guinea, geology, oil and gas, the Ceiba field, the Okume field, the Zafiro field, the Rio Muni Basin, the North Gabon Basin

Abstract. The oil and gas potential of the Republic of Equatorial Guinea, in which revenues from the sale of gas and oil account for more than 90 % of national income, is studied. An urgent issue is to increase oil and gas reserves, in this regard, the task is to assess the prospects for discovering new oil fields based on the analysis of geological information. The oil and gas basin of the Gulf of Guinea stretches as a narrow coastal strip along the western coast of equatorial Africa and is represented by thick sedimentary strata. The most significant basin of the Rio Muni contains a thick promising stratum of Senonian deposits overlain by Tertiary sediments, the thickness of which increases from south to north. Intervals of reservoir rocks with good porosity properties are known in both Tertiary and Cretaceous sediments, but industrial productivity has so far been established only in the Cretaceous sediment complex. Within the basin there are promising oil and gas bearing areas with anticlinal zones of oil and gas accumulation, which are associated with screening of tectonic, stratigraphic and lithological types. In the southern parts of the basin, saline deposits are not deep and are of interest for the exploration of oil deposits. The results of the study showed that in the Rio Muni Basin, the territory of Block K in the southernmost part of Equatorial Guinea is a promising region with proven hydrocarbon reserves. The Paleocene and Turonian reservoirs consist of undeformed slope submarine fans similar to the Deepwater Campos Basin in Brazil.

Acknowledgements

The authors of the article express their gratitude to the Government of the Republic of Equatorial Guinea for the materials provided.

For citation

Kotelnikov AE, Ondo Ayenvege LM. Geological structure and oil and gas content of the shelf of the Republic of Equatorial Guinea. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(2):174–181. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-2-174-181>

Введение

Геологический фундамент центральных и восточных районов Экваториальной Гвинеи состоит из докембрийских пород, которые являются частью кратона Конго. Они включают гнейсы, зеленокаменные породы, сланцы-амфиболиты и гранитоиды. Эти более древние породы перекрыты осадочными породами мезозойского, неогенового и четвертичного возраста на западе и вдоль побережья. Острова Пагалу и Биоко (Ан-нобон и Фернандо-Пу) имеют относительно недавнее вулканическое происхождение, являясь частью Камерунской вулканической линии¹.

Развитие нефтегазодобывающей отрасли во многом определяет экономический потенциал Республики Экваториальная Гвинея в самом ближайшем будущем. Среди африканских государств по уровню добычи нефти страна занимает седьмое место, газа – девятое, что вносит значительный вклад в ВВП страны [1]. Сегодня Экваториальная Гвинея сильно зависит от добычи и продажи сырой нефти. В частности, падение цен на сырую нефть в 2009 и 2014 гг. оказало ощутимое негативное влияние на экономику² [2]. В настоящее время суммарные запасы нефти и газа открытых

¹ Equatorial Guinea Geology. The Extractive Industries Source Book. Extractive Industries. URL: http://www.eisourcebook.org/1409_ExtractiveIndustries.html (accessed: 25.01.2022).

² Good-fit practice activities in the international oil, gas & mining industries. EISourceBook. URL: <https://www.resourcedata.org/dataset/rgi-good-fit-practice-activities-in-the-international-oil-gas-mining-industries> (accessed: 01.02.2022).

месторождений Республики Экваториальная Гвинея оцениваются в 150 млн т и 36 810 млн м³ соответственно. В связи с этим информация о возможном увеличении ресурсной базы углеводородов имеет первостепенное значение. Экономика Экваториальной Гвинеи в значительной степени зависит от нефтяной и газовой промышленности, на долю которой приходится более 60 % валового внутреннего продукта, 80 % налоговых поступлений и 86 % экспорта в 2015 г., согласно последним оценкам страновых отчетов Международного валютного фонда. В 2015 г. объем добычи углеводородов в Экваториальной Гвинее упал на 8,9 %, а общий ВВП снизился на 7,5 %. Это оказало давление на фискальную позицию правительства, вынудив его полагаться на внешние займы и государственные сбережения для удовлетворения потребностей в финансировании дефицита. Акцент на нефтяной и газовой промышленности также привел к отсутствию развития в неуглеводородных секторах³. Экваториальная Гвинея намерена увеличить добычу на 20 000 баррелей сырой нефти в день (б/с) к октябрю 2020 г., доведя производство до 140 000 б/с, как заявил министр горнодобывающей промышленности и углеводородов Республики Экваториальная Гвинея: «Мы ожидаем, что в этом году благодаря новым открытиям объем добычи увеличится еще примерно на 20 000 баррелей в день»⁴. Являясь членом Организации стран – экспортеров нефти (ОПЕК), Экваториальная Гвинея в настоящее время производит 120 000 баррелей нефти в сутки. В бюджете Экваториальной Гвинеи на 2020 г. цена на нефть прогнозировалась и была на уровне US\$ 51 за баррель [3].

По состоянию на 2016 г. Экваториальная Гвинея располагает 1 100 000 000 баррелей доказанных запасов нефти, занимая 39 место в мире, это около 0,1 % от общих мировых запасов нефти, составляющих 1 650 585 140 000 баррелей⁵. Доказанные запасы Экваториальной Гвинеи эквивалентны 579,6-кратному годовому потреблению.

Это означает, что без учета чистого экспорта нефти осталось бы примерно на 580 лет (при текущем уровне потребления и без учета недоказанных запасов. По состоянию на 2017 г. Экваториальная Гвинея располагает 1,3 трлн кубических футов (1,3 Tcf) доказанных запасов газа, занимая 65 место в мире, это около 0,019 % от общих мировых запасов природного газа, составляющих 6 923 Tcf. Доказанные запасы Экваториальной Гвинеи эквивалентны 30,9-кратному годовому потреблению. Это означает, что газа в стране осталось примерно на 31 год (при текущем уровне потребления и без учета недоказанных запасов)⁶. В 2019 г. доказанные запасы природного газа Экваториальной Гвинеи составили 39 млрд м³. Этот объем снизился по сравнению с предыдущими годами. В рассматриваемый период доказанные запасы природного газа в стране в целом ежегодно снижались. Для сравнения, в 2010 г.⁷ их объем составлял 82 млрд м³ [4]. Добыча сырой нефти в Экваториальной Гвинее увеличилась до 88 баррелей/день/1 тыс. в январе 2022 г. с 85 баррелей/день/1 тыс. в декабре 2021 г.⁸

1. Геологическое строение

Основные перспективы развития нефтегазодобывающей отрасли в настоящий момент связывают с освоением бассейна Рио-Муни (рис. 1), который является частью Западно-Африканской окраины, сформировавшейся во время разделения континентов и образования Южно-Атлантического океана в меловой и третичный периоды, содержащей перспективные отложения меловой и третичной систем, сформировавшиеся на территории рифта, образовавшиеся в раннемеловую эпоху. В пределах бассейна Северный Габон и южной части бассейна Рио-Муни отложения, накапливающиеся в зоне рифта, представлены породами озерных и аллювиально-дельтовых фаций барремского и неокомского возрастов, строение которых в настоящее время осложнено системой

³ *Equatorial Guinea: overview*. U.S. Energy Information Administration Independent Statistics & Analysis. <https://www.eia.gov/international/analysis/country/GNQ> (accessed: 15.01.2022).

⁴ Equatorial Guinea to increase oil output in 2020. *Energy Capital & Power*. URL: <https://energycapitalpower.com/equatorial-guinea-to-increase-oil-output-in-2020/> (accessed: 15.12.2021).

⁵ Equatorial Guinea oil: oil reserves in Equatorial Guinea. *Worldometer*. URL: <https://www.worldometers.info/oil/equatorial-guinea-oil/> (accessed: 09.02.2022).

⁶ Equatorial Guinea natural gas: gas reserves in Equatorial Guinea. *Worldometer*. URL: <https://www.worldometers.info/gas/equatorial-guinea-natural-gas/> (accessed: 09.02.2022).

⁷ Saleh M. *Statista: proven natural gas reserves in Equatorial Guinea 2010–2019*. URL: <https://www.statista.com/statistics/1267819/proven-natural-gas-reserves-in-equatorialguinea/> (accessed: 15.12.2021).

⁸ Equatorial Guinea crude oil production. *Trading Economics*. URL: <https://tradingeconomics.com/equatorial-guinea/crude-oil-production> (accessed: 15.12.2021).

дизъюнктивных нарушений. На территории бассейна Габон этот разрез включает слои песчаников с доказанной нефтегазоносностью, а также сланцы Кисенда и Мелания, которые рассматриваются в качестве перспективных для выявления залежей углеводородов. Данные отложения перекрывает мощная соленосная толща позднеаптского подъяруса, а также средне-поздне меловые и нижнетретичные морские известняки и песчано-сланцевые породы. Для перекрывающих отложений в результате проявления соляно-купольной тектоники сформирован широкий спектр перспективных ловушек, включая структуры облепания,

структурно-тектонические и примыкающих к стенкам соляных тел. В северной части бассейна Рио-Муни синрифтовый комплекс представлен преимущественно озерными отложениями позднебарремского – среднеаптского времен, строение которых осложнено формированием мегамасштабных разломов. Данный разрез перекрывается «переходной» последовательностью соляных и нефтяносных морских терригенных отложений. С альбской (Мадиела) карбонатной платформой, фиксируемой в пределах данной территории, и с альбско-туронской песчано-сланцевой толщей сейчас связываются основные перспективы нефтегазоносности.



Рис. 1. Обзорная карта территории Гвинейского залива с нефтяными месторождениями и бассейнами [5]
Figure 1. Overview map of the Gulf of Guinea territory with oil fields and basins [5]

В северной части Рио-Муни синрифтовый разрез состоит из позднебарремских до среднеаптских эффузивных пород и озерных сланцев, характеризующихся экстенсивным развитием региональных разломов вверх по склону и надвиговых структур вниз по склону. Синрифтовый разрез перекрывается «переходной» последовательностью хорошо развитых соляных и качественных морских нефтеносных интервалов исходных пород. Карбонатная платформа формации Альба Бенин (Мадиела), развитая на этой территории, плюс альбско-туронская песчано-сланцевая последовательность в настоящее время рассматриваются в качестве перспективных для генерации углеводородов, что целесообразно учитывать при планировании геологоразведочных работ в данном регионе. Также повышенный интерес для проведения геологоразведочных работ вызывает акватория шельфа Биоко, которая расположена в северо-восточной части исследуемого района, здесь выделяется углеводородная система. Она содержит песчаники, которые преимуще-

ственно классифицируются в качестве коллектора. Данная углеводородная система лежит под морскими глинистыми отложениями, которые включают исходные породы нефти и газа. Наиболее значимые с точки зрения генерации углеводородов являются глинистые породы формации Куа-Ибоэ и формации Аката (Исонго). Д. Росс и Н. Хемпстед считают, что они содержат кероген типа II и III [6]. Аккумуляция данной толщи, представленной переслаиванием песчаных и глинистых отложений третичного и четвертичного периодов, осуществлялась в дистальной части дельты р. Нигер, которая расположена практически на краю шельфа. При их седиментации наряду с течениями определенную роль сыграли процессы, развитие которых определено особенностями проявления гравитационного фактора. В частности, имели место оползни, турбедитовые потоки и т. п. Основные перспективные нефтегазоносные толщи достаточно хорошо выделяются на сейсмических профилях. Пример приведен на рис. 2.

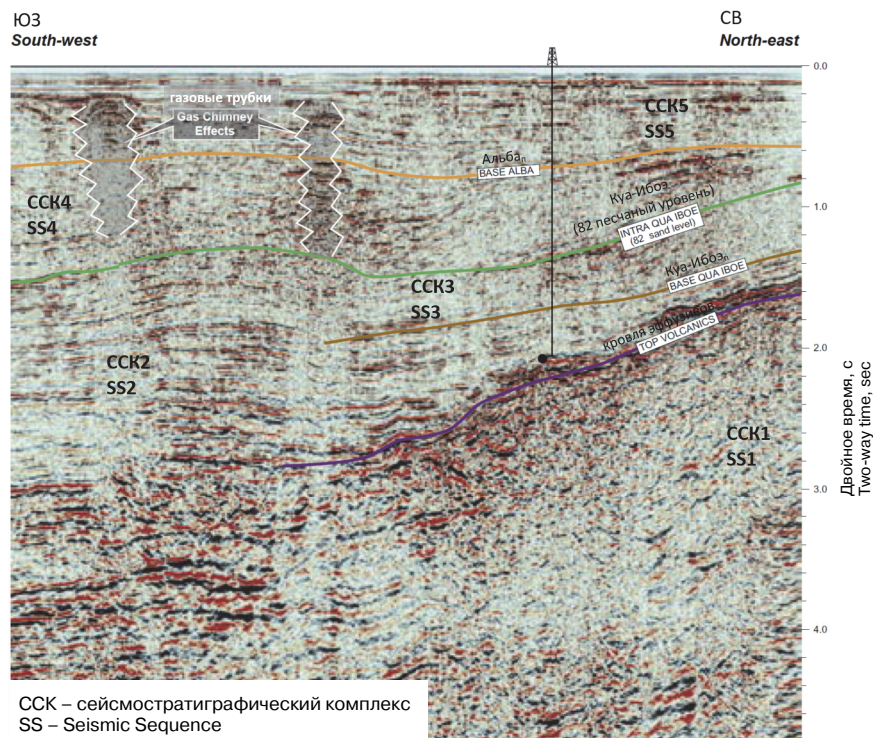


Рис. 2. Временной сейсмических разрез шельфа Биоко [7]
Figure 2. Temporal seismic section of the Bioko shelf [7]

В нижней части разреза выделяется сейсмостратиграфический комплекс (ССК), приуроченный к эффузивным породам. Волновое поле ССК1, приуроченное к данной толще, отличается от того, которое соответствует перекрывающим отложе-

ниям, как повышенными амплитудами, так и прерывистостью отражающих площадок. Выше с угловым несогласием залегают отложения формации Аката (Исонго), которым соответствует ССК2, здесь в интервале залегания подошвы

фиксируется несогласие типа подошвенного прилегания. В волновом поле, приуроченном к рассматриваемым отложениям, отмечается широкое распространение субпараллельных достаточно устойчивых отражений. Выше залегают отложения формации Куа-Ибоэ. В волновом поле, приуроченном к данному стратиграфическому подразделению ССКЗ, отмечается изменчивость свойств отражений, определенная уменьшению контрастности акустических жесткостей в северо-восточном направлении, что приводит к уменьшению протяженности отражающих площадок. Вблизи кровли формации Куа-Ибоэ наблюдается согласие типа эрозионного среза.

В ходе эпигенетических преобразований отложения, залегающие у подножия дельтового склона, где существовала зона сжатия, подверглись воздействию глинистого диапиризма, формированию дизъюнктивных нарушений и образованию в некоторых случаях структур опрокидывания. Коллекторы месторождений Зафиро приурочены к отложениям, аккумулярованным в фациальной зоне периодического развития турбидитовых потоков, и песчаникам формации Куа-Ибоэ, представляющих собой крупные песчаные тела, накопленные в местах развития достаточно устойчивых глубоководных течений. На месторождении Альба продуктивные отложения представлены песчаными отложениями формации Исонго, седиментация которых во многом осуществлялась в глубоководной обстановке благодаря действию подводных течений.

2. Нефтегазоносность шельфа

Сейсморазведочные работы МОГТ 2D на территории этого блока были проведены в 2002 г. в объеме 1084 погонных км [8]. Получены результаты для выявления нескольких потенциально перспективных объектов, связанных со значительными амплитудными аномалиями. Для подготовки этих объектов к выходу из глубокого бурения потребовались детальные сейсмические исследования. В 2008 г. полученные данные обработаны методом PSTM (временный перенос на сумму) компаниями GeoTrace и Weinman Geoscience (Даллас). При обработке полученных результатов были проведены специальные исследования, в том числе ДУО-анализ, для получения более полной информации о выявленных и подготовленных к бурению структурах. В районе перспективных объектов, охваченных сейсмическими данными, глубина акватории составляет от 750 до 1500 м. Недавно международным операторам было выдано несколько лицензий на участки на шельфе Экваториальной Гвинеи, Сан-Томе и Принсипи и Габона (рис. 3). Потенциал разведки в этом регионе считается очень высоким, и интерес со стороны нефтяных компаний резко возрос, о чем свидетельствуют новые тендеры в этих трех странах. Глубоководный бассейн Экваториальной Гвинеи весьма перспективен на нефть и газ, но остается практически неисследованным с помощью бурения.

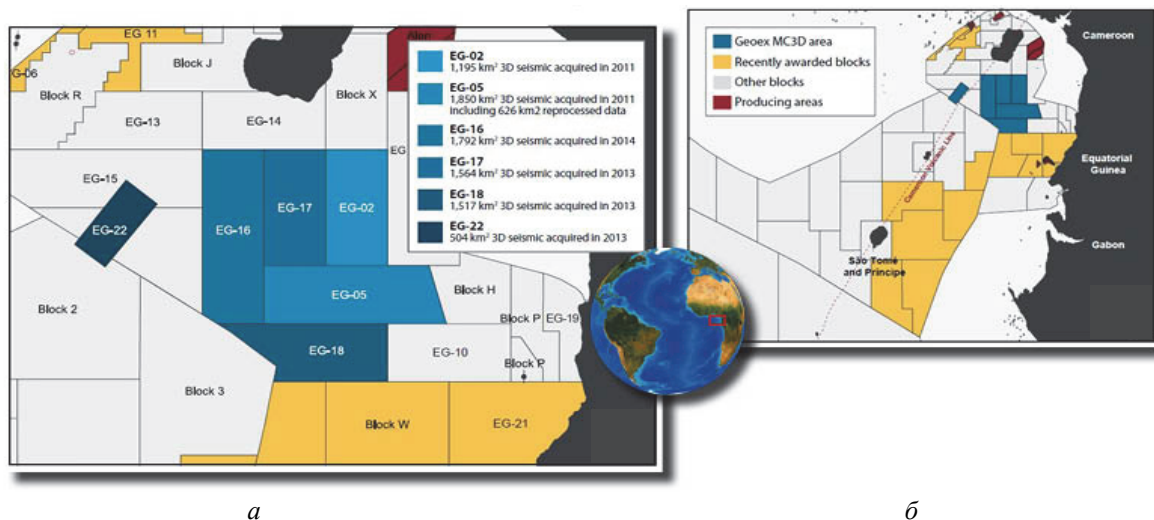


Рис. 3. Карта участков проведения 3D-съемки компанией Геоех в Экваториальной Гвинеи (а) и карта недавно выделенных блоков на шельфе Экваториальной Гвинеи и Сан-Томе и Принсипи (б) [9]
Figure 3. Map of 3D survey areas by Geoex in Equatorial Guinea (a) and map of recently identified blocks offshore Equatorial Guinea and Sao Tome and Principe (b) [9]

В период с 2011 по 2014 г. компания Geoex совместно с SAER Ltd. провела серию из пяти близких друг к другу спекулятивных сейсмических исследований 3D для Министерства горнорудной промышленности и углеводородов Экваториальной Гвинеи с целью продвижения геологоразведки в этом районе. В совокупности эти исследования охватывают площадь около 8400 км², включая блоки EG-02, EG-05, EG-16, EG-17 В и EG-18.

Новые 3D-съемки данной площади выявили большое количество новых перспективных участков углеводородов в Экваториальной Гвинеи (рис. 3). Новые сейсмические данные Geoex 3D обеспечивают практически непрерывное покрытие региона между островами и подводными горами Камерунской вулканической линии и окраиной Дуала – Рио-Муни. Они показали миоценовые песчаные системы, действующие в южном направлении вдоль оси бассейна Дуала, и мелово-палеогеновые песчаные системы, мигрирующие в западном направлении от континентальной окраины Рио-Муни. Данные также показывают структуру фундамента, отражающую синкинематическую структуру океанической коры в виде структур спрединг-риджа и зон океанических разломов. Наблюдается значительная деформация вышележащего осадочного разреза, связанная с повторной активацией структуры фундамента в течение нескольких тектонических эпизодов, включая сильное поднятие земной коры вдоль зон разломов в раннем миоцене, которое сыграло роль в формировании вулканических островов и подводных гор Камерунской вулканической линии. Комбинация базовой конструкции и систем вентиляции на дне бассейна способствовала расширенным возможностям улавливания в трехмерной области. Перспективы были очерчены путем объединения структурного картирования с применением методов зависимости амплитуды от смещения/угла (AVO/AVA). Аномалии AVO типа II/III (низкий акустический импеданс, высокопористые пески, заполненные углеводородами) характеризуют несколько перспективных объектов, которые были идентифицированы по данным Geoex 3D. На сегодняшний день подобные аномалии AVO типа II/III оказались успешными при каждом открытии в блоках O & I бассейна Дуала (нижний миоцен) и на месторождениях Сейба и Окуме в бассейне Рио-Муни (верхний мел).

Заключение

Результат проведенных исследований показал, что территория Экваториальной Гвинеи охватывает части двух осадочных бассейнов мирового класса, обладающих нефтегазоносным потенциалом и являющихся высокоперспективными на углеводороды с доказанными нефтяными системами, включающими морские нефтеносные исходные породы и высококачественные песчаные коллекторы. На севере страны, вокруг Биоко, шельфовый сектор охватывает дистальные части системы бассейнов Дельты Нигера – Рио-дель-Рей. Дельта Нигера является одной из крупнейших нефтяных провинций мира с доказанными запасами в 48 млрд баррелей нефти и 135 Tcf газа. В части бассейна, расположенной в Экваториальной Гвинеи, налажена добыча нефти и газа на месторождениях Зафино, Сейба и Альба, а также сделан ряд других открытий. Южная часть морского сектора Экваториальной Гвинеи покрывает бассейн Рио-Муни. Он примыкает к Камерунскому бассейну Криби-Кампо (Дуала) на севере (где расположены нефтегазовые месторождения Санага-Суд и Криби) и к Северо-Габонскому бассейну на юге, где обнаружены многочисленные месторождения нефти и газа. Прекрасный потенциал бассейна Рио-Муни продемонстрирован добычей нефти на месторождениях Сейба и Окуме и продолжающимися открытиями. Осадочный разрез под районами Биоко и Рио-Муни простирается в сторону океана до территориальной границы Экваториальной Гвинеи. Отложения дистального бассейна Дельты Нигера и глубоководных бассейнов Дуала и Рио-Муни сливаются в регионе к югу от Биоко, что дает значительный нефтяной потенциал всему шельфу Экваториальной Гвинеи.

Список литературы / References

1. Frynas G. The oil boom in Equatorial Guinea. *African Affairs*. 2004;103(413):527–546. <https://doi.org/10.1093/afraf/adh085>
2. Shlüter T. *Geological atlas of Africa: with notes on stratigraphy, tectonics, economic geology, geohazards, geosites and geoscientific education of each country*. Springer Berlin Heidelberg; 2006.
3. Denuola O. Equatorial Guinea to increase oil output in 2020. *Pumps Africa*. 2020;1(1). Available from:

<https://pumps-africa.com/equatorial-guinea-to-increase-oil-output-in-2020-2/> (accessed: 15.11.2021).

4. Remadna A, Cueto D, Marzouk H, Arteaga M, Lyubovskaya N, Shokripour M, Morales R, Arenas Lara R. *GECF in the world: GECF Annual Statistical Bulletin 2020*. 4th ed. Doha Qatar; 2020. p. 57.

5. Brownfield ME, Charpentier RR. Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea Province of west Africa. *U.S Geological Survey Bulletin 2207-C*. 2006. 32 p.

6. Ross D, Hempstead N. Geology, hydrocarbon potential of Rio Muni area, Equatorial Guinea. *Oil and Gas Journal*. 1993;91(35):96–100.

7. Hydrocarbons and mining in Equatorial Guinea. Petroleum potential. *Geology of Offshore Bioko*. 2012;(1):13–15. Available from: <https://pdfslide.net/documents/hydrocarbons-and-mining-in-equatorial-guinea-2012-02-17-1-equatorial-guinea.html?page=1> (accessed: 20.12.2021).

8. Khain VE, Polyakova ID. Large and giant hydrocarbon accumulations in the continent-ocean transition zone. *Geotectonics*. 2008;42:163–175.

9. Irons C, Bray R, Abrahamson P. New hydrocarbon prospects in Equatorial Guinea. *GEO EXPro*. 2018;15(1):52–54. Available from: <https://www.geoexpro.com/articles/2018/04/new-hydrocarbon-prospects-in-equatorial-guinea> (accessed: 20.12.2021).

Сведения об авторах

Котельников Александр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, директор департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-0622-8391, Scopus Author ID: 57205586833, Researcher ID: O-3821-2019, eLIBRARY SPIN-код: 6280-5070; kotelnikov-ae@rudn.ru

Ондо Айенвеге Лазаро Мба, магистрант, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-9667-0230; azaromba@outlook.es

About the authors

Alexander E. Kotelnikov, PhD in Geology, Associate Professor, Head of the Department of Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0622-8391, Scopus Author ID: 57205586833, Researcher ID: O-3821-2019, eLIBRARY SPIN-code: 6280-5070; kotelnikov-ae@rudn.ru

Lazaro M. Ondo Ayenvege, master student, Department of Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9667-0230; azaromba@outlook.es



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