



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

2022 Том 23 № 4

DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-4

<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, директор департамента механики и механики 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», факультет «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, Инженерная академия, 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-Интеритор, Ковильян, Португалия

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

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

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

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

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

Кавагути Дзюнъитиро – 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 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 А&М, Колледж-Стейшн, США

Мохамад 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, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

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

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

Спенсер В. Дэвид – профессор, Университет штата Пенсильвания, Юниверсити-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

Ясика 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.

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 Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования»:
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Подписано в печать 20.02.2023. Выход в свет 27.02.2023. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 12,09. Тираж 500 экз. Заказ № 1219. 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 4

DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-4

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

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia

Editor-in-Chief

Yury N. Razumny – Dr. (Technical Sciences), 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 – Dr. (Technical Sciences), Professor, Head of the Department SM-13 "Composite Materials for Aerospace", Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Assistant to the Editor-in-Chief

Svetlana V. Agasieva – Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, 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, Dr. (Technical Sciences), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), 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 – Dr. (Technical Sciences), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Vladimir M. Kapustin – Dr. (Technical Sciences), 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), Mission Control Center (TSUP), Central Research Institute for Machine Building (TsNIIMash), State Space Corporation "Roscosmos", 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 of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 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, Dr. (Technical Sciences), Professor, Institute for Systems Analysis, Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Harri A. Popov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

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

Ivan Y. Redko – Dr. (Technical Sciences), Professor, 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.

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

Razoumny Yu.N., Baranov A.A., Agrawal B., Dula A.M., Kreisel J., Kupreev S.A., Spencer D.B., Razoumny V.Yu., Yasaka T. The concept of on-orbit-servicing for next generation space system development and its key technologies (Концепция орбитального обслуживания для разработки космической системы следующего поколения и ее ключевые технологии)	269
Baranov A.A., Olivio A.P. Coplanar multi-turn rendezvous in near-circular orbit using a low-thrust engine (Компланарная многовитковая встреча на околокруговой орбите с помощью двигателей малой тяги)	283
Баринов Д.Я., Шорстов С.Ю. Исследование теплофизических характеристик органической эмульсии	293
Eroshenko V.O., Malkova M.Yu., Zadiranov A.N., Meshcheryakov A.V., Ghorbani S. Optimization of the structure of turbine blades produced by methods of additive technologies (Оптимизация конструкции лопаток турбин при производстве методами аддитивных технологий)	302
Ходяков А.А., Хлопков С.В., Асоян А.Р., Истомин Д.В., Алибекова Д.Р., Нарожный А.А. Физико-химические свойства инновационных и высококачественных марок бензина	311
Орехов Г.В., Щесняк Л.Е. Сопряжения закрученного потока с продольным течением	322
Страхов П.Н., Пономаренко А.С. Особенности засоления продуктивных отложений углеводородов юга Восточно-Сибирской платформы	336
Карелина Е.В., Мотузов И.С., Марков В.Е., Панасенко Ю.Н., Жорж Н.В., Носаева О.В. Изучение вулканогенно-осадочных пород дзыхринской толщи в пределах абхазской зоны Гагрско-Джавского поднятия Северо-Западного Кавказа	343
Abramov V.Yu., Vikentyev I.V. A regional and local geophysical study of the western overthrust belt in North-Western Huanuco, North Peru (Региональные и локальные геофизические исследования западного пояса надвигов на северо-западе Хуануко, Северное Перу)	355

CONTENTS

Razoumny Yu.N., Baranov A.A., Agrawal B., Dula A.M., Kreisel J., Kupreev S.A., Spencer D.B., Razoumny V.Yu., Yasaka T. The concept of on-orbit-servicing for next generation space system development and its key technologies	269
Baranov A.A., Olivio A.P. Coplanar multi-turn rendezvous in near-circular orbit using a low-thrust engine	283
Barinov D.Ya., Shorstov S.Yu. Investigation of thermophysical characteristics of organic emulsion	293
Eroshenko V.O., Malkova M.Yu., Zadiranov A.N., Meshcheryakov A.V., Ghorbani S. Optimization of the structure of turbine blades produced by methods of additive technologies	302
Khodyakov A.A., Khlopkov S.V., Asoyan A.R., Istomin D.V., Alibekova D.R., Narozhnyi A.A. Physical and chemical properties of innovative and high-quality grades of gasoline	311
Orekhov G.V., Shchesnyak L.E. Interference of swirling flow with longitudinal stream	322
Strakhov P.N., Ponomarenko A.S. Features of filling productive hydrocarbon deposits in the south of the East Siberian platform	336
Karelina E.V., Motuzov I.S., Markov V.E., Panasenko Yu.N., Zhorzh N.V., Nosaeva O.V. The study of volcanic-sedimentary rocks of the Dzykhra sequence within the Abkhazian zone of the Gagra-Java uplift, Northwestern Caucasus	343
Abramov V.Yu., Vikentyev I.V. A regional and local geophysical study of the western overthrust belt in North-Western Huanuco, North Peru	355



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-269-282
UDC 629.76

Research article / Научная статья

The concept of on-orbit-servicing for next generation space system development and its key technologies*

Yury N. Razoumny^a, Andrey A. Baranov^{a,b}, Brij Agrawal^c, Arthur M. Dula^d, Joerg Kreisel^e,
Sergei A. Kupreev^a, David B. Spencer^f, Vladimir Yu. Razoumny^a, Tetsuo Yasaka^g

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

^bKeldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation


^cNaval Postgraduate School, Monterey, United States of America

^dThe Law Office of Art Dula, Houston, United States of America

^eiBOSS GmbH, Aachen, Federal Republic of Germany

^fPennsylvania State University, Pennsylvania, United States of America

^gInstitute for Q-shu Pioneers of Space, Inc., Fukuoka, Japan

 yury.razoumny@gmail.com

Article history

Received: August 22, 2022

Revised: November 15, 2022

Accepted: November 18, 2022

Keywords:

next-generation space systems, on-orbit servicing, on-orbit satellite, repairing, refuelling, serviced satellites, servicing satellites, block-modular, standard, flexibility, economics of scale

Abstract. Over the last years many companies and national agencies in different countries have been involved in development of various technical aspects of on-orbit-servicing (OOS). US and Russian OOS experiences are described. The problem of OOS in general is considered as a bit wider. It is shown that OOS relates to development of the next-generation space infrastructure and the solution of the problem of OOS, to a great extent, predetermines the characteristics of the next-generation space systems. Two equally important directions are stressed for OOS activities: first, making satellites serviceable, and the second, creating directly servicing systems. Implementation of each direction includes a wide range of developments. In the first case, we have to consider a capability of docking with the serviced satellite, a guaranteed access to the satellite components, block-modular structure of the serviced satellite, standardization of hardware and connectors, etc. Implementation of the second direction varies from the development of servicing methods and servicing systems to satellite orbits and constellation optimization. The existing and perspective key technologies for serviceable and servicing satellite are presented. It is shown, that the economic benefit of OOS must be justified by more thoroughly from an end-to-end perspective taking into account the features of the future space infrastructure. Servicing allows extending operational lifetime of satellites and thus reducing lifecycle cost, or moreover enable for entirely new systems and mission. These effects could be achieved not only through refuelling or repairing of the satellites, but also through satellite orbit correction. OOS creates a prospect of establishing a commercial servicing and debris removal network lending form the same technology base, which constitutes, however, separate technological problems, which are closely connected with OOS.

* The publication was prepared by Study Group 3.22 of International Academy of Astronautics, and partially presented at 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 25–29 September 2017, IAC-17-41654 [1].



For citation

Razoumny YuN, Baranov AA, Agrawal B, Dula AM, Kreisel J, Kupreev SA, Spencer DB, Razoumny VYu, Yasaka T. The concept of on-orbit-servicing for next generation space system development and its key technologies. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):269–282. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-269-282>

**Концепция орбитального обслуживания
для разработки космической системы следующего поколения
и ее ключевые технологии***

Ю.Н. Разумный^a, А.А. Баранов^{a,b}, Б. Агравал^c, А.М. Дула^d, Й. Крайзель^e,
С.А. Купреев^a, Д.Б. Спенсер^f, В.Ю. Разумный^a, Т. Ясака^g

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bИнститут прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва, Российская Федерация

^cВоенно-морская школа, Монтерей, Соединенные Штаты Америки

^dАдвокатское бюро Art Dula, Хьюстон, Соединенные Штаты Америки

^eiBOSS GmbH, Ахен, Федеративная Республика Германия

^fПенсильванский государственный университет, Пенсильвания, Соединенные Штаты Америки

^gИнститут пионеров космоса Q-shu, Inc., Фукуока, Государство Япония

✉ yury.razoumny@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 22 августа 2022 г.

Доработана: 15 ноября 2022 г.

Принята к публикации: 18 ноября 2022 г.

Ключевые слова:

космические системы нового поколения, орбитальное обслуживание, ремонт, дозаправка, спутник на орбите, обслуживание спутников, блочно-модульные, стандарт, гибкость, экономическая выгода

Аннотация. За последние годы многие компании и национальные агентства в разных странах были вовлечены в разработку различных технических аспектов орбитального обслуживания. Описан опыт орбитального обслуживания в США и России. Рассматривается проблема орбитального обслуживания в целом. Показано, что орбитальное обслуживание относится к развитию космической инфраструктуры следующего поколения и решение проблемы орбитального обслуживания в значительной степени предопределяет характеристики космических систем следующего поколения. Для реализации орбитального обслуживания выделяются два одинаково важных направления: 1) обеспечение работоспособности спутников; 2) создание систем непосредственного обслуживания. Реализация каждого направления включает в себя широкий спектр работ. В первом случае нужно учитывать возможность стыковки с обслуживаемым спутником, гарантированный доступ к компонентам спутника, блочно-модульную структуру обслуживаемого спутника, стандартизацию аппаратного обеспечения и разъемов и т. д. Реализация второго направления варьируется от разработки методов обслуживания и систем обслуживания до спутниковых орбит и оптимизации группировки. Представлены существующие и перспективные ключевые технологии для исправного обслуживающего спутника. Показано, что экономическая выгода орбитального обслуживания должна тщательно обосновываться с глобальной точки зрения с учетом особенностей будущей космической инфраструктуры. Обслуживание позволяет продлить срок службы спутников, снизив таким образом стоимость жизненного цикла, более того – создавать совершенно новые системы и миссии. Эти эффекты могут быть достигнуты не только посредством дозаправки или ремонта спутников, но и за счет коррекции их орбит. Предлагаемое орбитальное обслуживание создает перспективу создания коммерческой сети обслуживания и удаления мусора, сформированной на той же технологической базе, что, однако, представляет собой отдельные технологические проблемы, которые тесно связаны с орбитальным обслуживанием.

* Публикация подготовлена исследовательской группой 3.22 Международной академии астронавтики и частично представлена на 68-м Международном астронавтическом конгрессе (IAC), Аделаида, Австралия, 25–29 сентября 2017 г., IAC-17-41654 [1].

Для цитирования

Razoumny Yu.N., Baranov A.A., Agrawal B., Dula A.M., Kreisel J., Kupreev S.A., Spencer D.B., Razoumny V.Yu., Yasaka T. The concept of on-orbit-servicing for next generation space system development and its key technologies // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 269–282. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-269-282>

Introduction

The general problem of the next-generation space system development based on the on-orbit-servicing (OOS) concept with a focus on its technological, theoretical, economic aspects is considered.

Over the last years many organizations in different countries have been involved in development of various technical aspects of on-orbit satellite servicing, which to a great extent predetermines the characteristics of next-generation space systems. Such efforts are now carried out in the USA (DARPA, Boeing Company, SSL, MDA), Russia (Roscosmos), Germany (German Aerospace Center DLR, Airbus Defence and Space ADS, OHB Group with formerly Kayser-Threde), Japan (JAXA, Tokyo Institute of Technology, Astrocalle), Sweden (Swedish Space Corporation, Orbital Satellites Services AB), Spain (Sener), as well as in other countries.

Even though many companies and national agencies are currently conducting research in on-orbit servicing, there is an organizational challenge, as it is hard to tackle the big picture of the problem of OOS due to its scope. This complex problem demands a comprehensive top-down approach and can only be addressed properly by a coordinated group comprising specialists of different backgrounds beyond space and technology. It is also obvious that a successful study should incorporate ideas and experiences that come from different scientists and from different countries.

Moreover, we consider that the solution of the OOS problem to a great extent predetermines the characteristics of next-generation space systems. Whatever efforts have been made to this end are either incomplete or too specific. The solutions at hand deal with specific tasks and can only be regarded as a part of a bigger pattern that is yet to be described. The study has never been undertaken at such a scale, and it is a chance to generalize all the existing experience and take a step further, by improving particulars and integrating them into a complex infrastructure.

Servicing infrastructure can only be regarded within the context of advanced next-generation space sys-

tems the ones that are going to be economically feasible and effectively serviced. This means that anyone who commits to the study should possess knowledge not only of the basic on-orbit servicing concepts, but also of the future space systems themselves.

Researching a particular way of servicing could be pointless, if this study doesn't fit with the way the future space systems are going to operate. At the same time, a process of mutual adjustment and dialogue between the two parties – those who develop special-purpose space systems to be serviced, and those design servicing infrastructure – should be initiated as soon as possible in the design process to find an optimal solution that would make space systems serviceable and at the same time allow them to perform their main missions without loss in functionality.

The problem is still far from being solved – only separate specific solutions exist [2]. Therefore, a new comprehensive study must be initiated. Its distinctive features from other research in the same field are the following:

- 1) the generic challenges and opportunities of a next generation space on-orbit servicing infrastructure are investigated;
- 2) both study specific solutions for creation of space on-orbit servicing system, and different aspects of servicing infrastructure are investigated;
- 3) by uniting different fields of research, the attention is paid to details, as well as a guided, coordinated effort is presented to achieve a common goal.

This creates balance between diversity and purposefulness, leading to an all-encompassing and non-redundant study.

The study is aimed at following purposes:

- 1) to evaluate experience and detect trends and problems that matter today;
- 2) to set primary definitions and define the concept of OOS, to single out components of servicing and serviced systems, and to point out the stages of a servicing operation;
- 3) to identify the main technologies that must be enhanced with respect to servicing and serviced systems, and to propose solutions for optimizing and adjusting orbital formations of serviced and servicing satellites;

4) to evaluate the problem within the context of next-generation space systems by envisioning an outline of advanced servicing networks for the predicted space population;

5) to estimate economic and jurisdictional aspects of OOS, considering the possibility of complete interface standardization, calculating benefit, and researching international space law;

6) to outline roadmaps and to research options of international cooperation.

Thus, the study encompasses all sides of the problem – purely technological and engineering, mathematical and methodological, as well as economic, organizational, and legal.

1. Lessons learned

To plan, we need to know how the problem originated, how it has been dealt with before and what trends revealed themselves earlier that now still have some impact. Lessons learned in the past at the stage of creating the modern servicing space infrastructure should be studied closely and open-mindedly.

The problem of OOS emerged together with the problem of space exploration – as it happens, even the most reliable technologies tend to malfunction and even in the most successful missions there are cases of minor emergencies.

1.1. US

Some of the most prominent pages of the American space servicing chronicles relate to servicing the first US orbital station, Skylab. In 1973, the onset of its mission was accompanied by some major difficulties. Because of the damage that occurred during its launch, solar arrays of Skylab were not deployed properly; micrometeoroid shields, which also served as thermal managing device, failed, and the station could not be made sufficiently habitable. However, a crew of astronauts arrived at Skylab and saved the station, replacing thermal shields and deploying the solar panels, thus performing the first major on-orbit repair operation.

After the incident, many lessons were derived from the experience. One of the major ones concerned the approach to space systems development and is still relevant today.

Designing and operating a space vehicle is an interdisciplinary problem that requires good coordination at all stages. Excessive paperwork should be avoided when possible! Every stage of space-flight relates to another and yet must be treated by

a team of qualified specialists who know their trade. Moreover, as during many other events of manned space exploration era, OOS proved to be a dangerous and demanding enterprise – a field of many outstanding deeds but also a field to be made safer.

Another important year is 1984. It was marked by two landmark events, and the successful completion of the first one in a way inspired the courage with which the other one was undertaken.

After the failure of attitude control system, the Solar Maximum Mission (SMM) satellite had been out-of-order for quite some time. However, in 1984, a team of astronauts was sent to repair the malfunctioning vehicle.

After successful rendezvous and capture manoeuvres, the Challenger crew replaced the failed parts by taking advantage of the satellite's modular structure.

Moreover, this repair mission was the first-time that robotic tools were combined with human outer space operations, setting one of the most important ongoing trends.

Later in the year, Discovery's mission substituted two new telecommunication satellites for two damaged ones, returning the replaced spacecraft to Earth for refurbishment after complex manned on-orbit operations, thus saving great sums of money. Both satellites were later resold and re-launched into space.

The lessons learned from these operations could be stated as follows: Design of serviced spacecraft might tremendously facilitate servicing operations; however, one should be ready to service "unserviceable" satellite (like the Hubble space telescope which has been successfully repaired on several occasions). Moreover, on-orbit servicing could lead to direct commercial benefit, for millions of dollars spent could be salvaged in one operation.

1.2. Russia

Looking at the Russian OOS experience it is worthwhile mentioning a few selected seminal achievements.

In 1985 Russia restored Salut-7. After failure in main command link equipment, the station entered a stage of fully uncontrolled flight. Souyz-T13 crew (with astronauts Janibekov and Savinykh) performed an almost impossible operation and restored the station after completing the exhausting manual docking.

After that, humanity learned that almost any space object may be captured and restored with due efforts from ground systems and manned spacecraft.

However, we also understood that the less frequent such situations occur, the better.

In 1986–1996 Russia broadened its experience of operating Salut stations by managing the Mir Space Station. Countless docking and repairing operations of all kinds were performed during this period. Aside from purely technological and scientific advances, humanity learned that every servicing technology should be tested under operational conditions. Only tested and space-qualified technologies represent a real proof of concept.

1.3. Russia and US

Numerous expeditions to the Mir Space Station and later to the International Space Station have demonstrated that the efficiency of on-orbit servicing is dramatically enhanced by international cooperation – each nation should concentrate on what it does best.



Figure 1. “Soyuz TMA-10M” manned spacecraft (Russia) (photo by S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia)



Figure 2. “Progress M-M” cargo spacecraft (Russia) (photo by S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia)



Figure 3. “SpaceX Dragon” unmanned spacecraft (US) (photo by Space Exploration Technologies Corporation)



Figure 4. “Orbital ATK Cygnus” automated cargo spacecraft (US) (photo by Orbital ATK Inc.)

During the Mir Station operation, the Russian orbital facility received US Space Shuttles that docked to the station using ports initially intended for Russian Buran spacecraft. This signified how important unified and standard interface could be for successful international programs and acted as a precursor of ISS. The mode of current ISS servicing largely relies on Russian Soyuz (Figure 1) and Progress vehicles (Figure 2), that deliver astronaut crews and additional equipment to the station as well as US vehicles SpaceX Dragon (Figure 3) and Orbital ATK Cygnus (Figure 4) that carry out resupplies and logistics missions for ISS. Aside from the resupplying function, Progress spacecraft are used to assist in orbit correction of ISS, which is another promising direction of on-orbit servicing in general.

There is a significant backlog in the development of methods for calculating the parameters of optimal rendezvous maneuvers [3–5] performed by high or low thrust engines.

The rendezvous problem is solved, among other things, when the orbits of the active spacecraft and the target spacecraft have a significant difference in the longitude of the ascending node [3].

1.4. Germany

Globally, OOS has been initially promoted by the roboticists. Space automation and robotics have a long history in Germany. Among many world-recognized scientists, technologies, and projects (i.e., ROTEX and German Japanese ETS-VII in the 1990ies or later ROKVISS aboard ISS, and more, also related design and simulation tools), DLR and industry initiated a focus on OOS from around 2000, and, together with CSA and JAXA gave the topic OOS a boost last decade.

Since 2010, the German space program addresses two programmatic lines in the context of OOS. Taking into consideration that - besides i.e., life extension, re-orbiting or refuelling – any future OOS will require cooperative targets, hence space infrastructure elements designed to be serviced, DLR nowadays distinguishes between “active” and “passive” OOS. Active OOS comprises robotic technologies and capabilities to conduct any of the various “services” discussed, investigated and promoted by the global space community. Whereas passive OOS is geared around the necessary components enabling OOS. In other words, the latter means standardized functional building blocks and interfaces as pre-requisite for OOS. A prominent activity is iBOSS – intelligent building blocks for on-orbit satellite servicing and assembly – described in brief further below (under 4.4). iBOSS is a collaborative research program funded by DLR Space Administration. The project is being conducted by the iBOSS consortium comprising the renowned German institutions TU Berlin (system lead), MMi and SLA of RWTH Aachen University, FZi, RIF and JKIC.

1.5. Other actors and summary of lessons learned

There are also further activities and experiences made in Europe, Japan, China, India, and others, which cannot be covered in detail here.

Key take:

- principally every space object may be captured and restored with due efforts from ground systems and manned or un-manned spacecraft;

- OOS technologies need to be tested under operational condition (mandatory) parallel to system studies;

- no routine OOS has been established due to missing proof of concept both technically and commercially.

2. Definitions and concepts

All the examples that we have considered so far demonstrate considerable progress and outstanding outlook. And yet they were all aimed at the solution of specific tasks, most of which had to be dealt with in the state of emergency. The problem in general is a bit wider, and in this effort, we shall attempt to cover it in its fullness and complexity.

Let us look at main definitions and concepts to make sure that we operate within the same notional reference system.

Satellite OOS relates to solutions for creating next-generation space infrastructure that will allow saving funds that are currently spent on replenishing expensive orbital systems, which has to be done for the lack of full-scale satellite on-orbit servicing. It would imply the capability to correct orbits and to visually examine, recover, repair and refuelling satellites. This property of the next-generation space infrastructure will revolutionize space industries worldwide.

OOS includes, but is not limited to:

- orbital corrections and modifications to failed and out of control satellites;
- detailed visual inspection of satellite assets;
- spacecraft salvage options and debris clean up;
- rescuing mis-launched, stranded satellites and delivering them to their intended orbits;
- on-orbit mobility to meet international and national mission needs;
- refuelling spent satellites in orbit to extend life;
- repairing and correcting malfunctioning satellite in orbits;
- transportation and support for lunar and planetary missions.

The servicing satellite is to provide the following three typical operations:

- observation of the satellites with the purpose of determination the nature of the issue;
- technical assistance – repairing, refuelling, etc.;
- graveyarding of the satellites (moving the satellites to graveyard orbits) is implemented in case if the satellite damage is irreparable.

Two equally important directions (Figure 5) could be revealed in the development of the next-

generation space systems based on the on-orbit satellite servicing:

1) making satellites and satellite constellations serviceable;

2) creating servicing satellites and designing their constellations for the performance of the satellite on-orbit servicing operations.

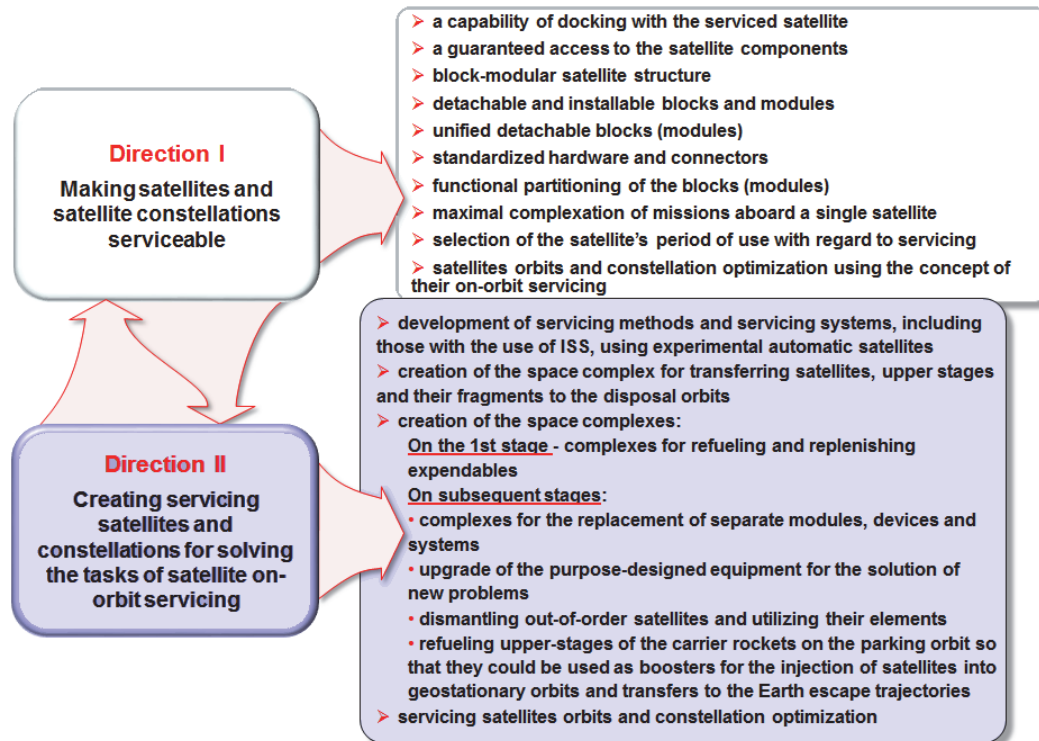


Figure 5. Directions for the development of satellite on-orbit servicing

Implementation of the first direction includes a wide range of developments, from providing the docking with the serviced satellite, even a non-cooperative one, to the serviced satellites orbits and constellation optimization which allows fully taking advantage of the benefits of OOS. The list of such developments includes (but is not limited to): a capability of docking with the serviced satellite, a guaranteed access to the satellite components, block-modular satellite structure, detachable and installable modules, unified detachable modules, standardized hardware and connectors, functional partitioning of the modules, maximal complexation of missions on-board a single satellite, selection of the satellite's period of use with regard to servicing, satellites orbits and constellation optimization using the concept of their OOS.

Implementation of the second direction includes:

- development of servicing methods and servicing systems, including those with the use of ISS, using experimental automatic satellites;

- creation of the space complex for transferring satellites, upper stages, and their fragments to the disposal orbits;

- optimization of satellite constellation on-orbit infrastructure;

- creation of the on-orbit-servicing space complexes in two sequential stages mentioned below.

The complexes for refuelling and replenishing expendables are created on the 1st stage, as well as on the subsequent stages : complexes for the replacement of separate modules, devices, and systems; upgrade of the purpose-designed equipment for the solution of new problems; dismantling out-of-order satellites and utilizing their elements; refuelling upper stages of the carrier rockets on the parking orbit so that they could be used as boosters for the injection of satellites into geostationary orbits and transfers to the Earth escape trajectories.

All the problems mentioned above for the development of the next-generation space systems require an extensive study.

3. Key technologies

This section focuses on some of the key technologies that could render satellites more serviceable. These technologies will be reviewed in the corresponding sections of this paper.

3.1. Key technologies enabling easier service (required functions for serviceable satellite)

Let us consider how to aid rendezvous and docking operations. Successful rendezvous is a problem of accurate and optimal manoeuvring that transfers a servicing satellite into the vicinity of a serviced spacecraft. Some reciprocation on the part of the serviced spacecraft should not be ruled out and could be implemented according to the task. For example, ISS sometimes implements short manoeuvres to facilitate its rendezvous with other vehicles.

Docking and capturing implies a different procedure. It concerns operation in the direct proximity of the serviced satellite. We could make the serviced satellites more noticeable both by mechanical and radio means, through equipping it with radio-frequency transponders for information exchange, as well as optical devices and surface features. Docking aides could be installed and when possible, standardized interface could be used; attitude control system could be enhanced to provide a desired relative position for servicing.

Some spacecraft are meant to be serviced by robotic means only, others are man-oriented. Depending on this the interfaces may also be adapted to the provisioned servicing agent. Those nodes that need to be serviced must be visible and accessible without breaching security and protection rules, which is a very complex engineering task.

Block-Modular Structure allows speeding up servicing operation by substitution of malfunctioning modules and easier detection of failures. However, it is a complex technological task because some systems are simply not meant to be modular and because we must provide a certain degree of redundancy that allows not affecting main operations while repairing of a certain sector is underway. The function of each module should be clear and understandable.

Common international interfaces or compromise solutions could make spacecraft more accessible. This concerns not only docking operations, but also all other kinds of electrical and data interfaces.

3.2. Key technologies for servicing systems (performing service menus with a focus on the robotic approach and a brief mention of the human approach)

Servicing systems themselves should also be upgraded and in some cases, developed with a clean sheet.

This problem should, on all levels, be solved in conjunction with the previous one of making the satellites more serviceable. The technological and data interface should be correlated, but also orbital formations and constellations should be selected in such a way as to make the servicing process optimal and less costly.

We should mention that the importance of robotic and automated operations will increase. Technologies of autonomous operations are currently the least developed among servicing technologies and are one of the most obvious candidates for extensive research. Some amazing specimens of the coming age, like the Canadian Special Purpose Dexterous Manipulator (SPDM, Dextre) that operates on ISS, are already functioning (Figure 6). However, there is still a long way to go to adapt robotic technologies to an even less friendly environment and increase its role in some daily operations.

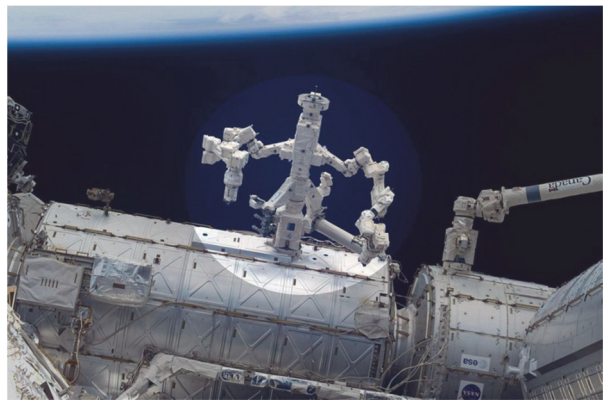


Figure 6. Canadian special purpose dexterous manipulator (SPDM) – robotic device for ISS repairs otherwise requiring spacewalks (photo by MDA Space Missions, MDA Ltd.)

This paper will expound on specific servicing systems that will have to be developed in the following categories:

- systems for satellite/debris transfer;
- systems for refuelling/replenishing expendables;
- systems for replacement of modules/devices;
- systems for dismantling old satellite and utilizing their elements;
- systems to refuel carrier rockets for higher energy orbit injection.

These are the concrete target-dependent technologies for capture/docking and carrying-out servicing operations that will engage whole teams of researchers from technological and theoretical domains.

On-orbit verification/demonstration/experiment is another important aspect that is currently researched by our study group. As was mentioned earlier, no technology can be considered as ready-to-use unless it has been successfully tested in its future environment.

3.3. Key technologies for orbit and constellation design for next-generation space infrastructure

Astrodynamics is as important a field as technological solutions. Without an expedient orbital structure and optimal manoeuvring, it is pointless to count on material profits. Multiple papers were devoted to the astrodynamical problems of on-orbit-servicing¹ [6; 7].

There are two approaches to Orbital Design of Next-Generation Space Infrastructures. The first one considers placing serviced and servicing satellites into the same or near-by orbits, which allows making the servicing manoeuvres less costly by means of avoiding expensive orbital plane change manoeuvres. Such groups of active and passive satellites are called clusters, and the method itself is referred to as *clustering*. However only historically established clusters are feasible – those at geostationary and GLONASS/GPS medium Earth circular orbits (MEO).

Creating low Earth orbits (LEO) clusters would imply sacrificing mission goals in favour of more convenient servicing or otherwise making an unreasonably extended servicing infrastructure. That is why we introduce a second approach for the most densely populated LEO orbits. We state that we shall have to design a general constellation of space stations to service satellites within their corresponding responsibility zones by optimal flybys.

Designing orbital formations of space stations with detachable modules that perform optimal flybys of designated satellites in a series of rational rendezvous manoeuvres is a complex problem.

The problem includes optimization of orbits and orbital formations of the space stations. Moreover, the research reveals that constellations of serviced and servicing satellites should be considered as one complex dynamic system.

A modern satellite formation structure is marked by the presence of completed satellite clusters in the regions of geostationary orbits (telecommunication satellites) and medium circular orbits with altitudes about 20 000 km (navigation satellites). To some extent it can be stated that elliptic orbits of Molniya-type telecommunication satellites also form a cluster, but on-orbit servicing of these satellites is not considered now. Performing servicing of the satellites of these clusters could provide a high economic efficiency of on-orbit servicing. At the same time, a modern structure of operating constellations is also defined by a total absence of any order in the region of low-Earth orbits (in particular, important sun-synchronous orbits) and in the regions of Earth escape orbits or the orbits, providing transfers to the geostationary orbits. The absence of any order or, let's say, "clustering" in selection of these orbits is since the parameters of such orbits and constellations are selected only upon satisfying the mission objectives in a maximally efficient way.

Classification and feasibility estimation of the service schemes in the region of LEO yield results given in the Table. Here the classification of possible service plans is offered by the servicing facilities location (on-orbit/on an orbital station/on Earth), by their re-use ratio (single-use/reusable), by the supply scheme of servicing facilities (from the Earth/from orbital station/no supply), by presence of crew on-board (manned/automatic), by the amount of satellites serviced per one voyage (one satellite/several satellites), as well as by the type of servicing operations performed (refuelling and/or maintenance). For each obtained servicing variant, an approximate estimation of required specific impulse of a servicing satellite's engine is given (in assumption that a mean angle of an orbital plane change required for a transfer to the serviced satellite is equal to 90°). Besides, duration (in years) of an actual implementation of such engine can also be found in Table.

The schemes marked in the table with a darker shade are realizable now (in 2018). The analysis of the results allows coming to a conclusion that in the short term it is possible to implement a ser-

¹ Razoumny YuN, Baranov AA, Kozlov PG, Malyshev VV, Makarov YuN, Moshnin AA, Razoumny VYu. *Space servicing system and method of its construction*. RF Patent for Invention No. 2535760. C1. Application 2013146588/11, 18.10.2013. Date of publication 20.12.2014 (bulletin No. 35). Int. Cl. B64G 1/10, G05D 1/00. (In Russ.)

servicing system for LEO satellites only by the means of servicing satellites located on the Earth. Moreover, it is only possible to provide servicing for

one satellite per voyage. From the economic efficiency point of view such satellite should indeed be unique.

Classification and feasibility estimation of the service schemes in the region of LEO

Servicing facilities location	Reuse ratio	Supply scheme	Presence of crew on-board	Number of satellites serviced per one voyage	Type of servicing operations performed	Engine's specific impulse, s	Years of possible implementation
On-orbit	Reusable	From the Earth	Automatic	Several	Refuelling + maintenance	2500*	2040–2050
		From orbital station	Automatic	Several	Refuelling + maintenance	2500*	2040–2050
		No supply	Automatic	One	Refuelling + maintenance	1000*	2035–2040
				Several	Refuelling + maintenance	2500*	2040–2050
On an orbital station	Single use	No supply	Automatic	One	Refuelling + maintenance	700*	2035–2040
				Several	Refuelling + maintenance	2500*	2040–2050
	Reusable	From orbital station	Manned	Several	Maintenance	10000*	After 2050
			Automatic	Several	Refuelling + maintenance	2500*	2040–2050
On Earth	Single-use	No supply	Automatic	One	Refuelling + maintenance	310	Since 2018
				Several	Refuelling + maintenance	2500	2040–2050
	Reusable	No supply	Automatic	One	Refuelling + maintenance	310	Since 2018
				Several	Refuelling + maintenance	1000	2035–2040
			Manned	One	Maintenance	310	Since 2018
				Several	Maintenance	10000	After 2050
	From the Earth	Automatic	Several	Refuelling + maintenance	1000	2035–2040	
			Manned	Several	Maintenance	1000	2040–2050

Notes: * mean angle of an orbital plane change required for a transfer to the serviced satellite is assumed equal to 90°;
 – schemes, implementable in the short term.

We have reviewed above the first of the two possible approaches to the selection of orbits and formations of serviced and servicing satellites based on “rigid clustering” of the serviced satellites. Even though such way may lead to a considerable increase in the efficiency of the usage of space systems, as it was shown before, still, this approach is characterized by several disadvantages.

First, the greatest economic effect is attained in case of servicing on the orbits of naturally (histori-

cally) formed clusters (like geostationary orbits). Another negative circumstance underlying “rigid clustering” is that servicing of the existing formation of LEO surveillance satellites is expedient only for the unique spacecraft, while clustering LEO formations leads to some loss in observation performance, and especially so in the cases of multi-satellite operation missions.

Let us review the subject-matter of a new technical solution for the optimal selection of satellite

orbits and constellations, which are to provide the servicing of “non-clustered” satellite groups. It should be mentioned that the catalogue of serviced satellites, contained in such non-clustered structures, is always altering with time due to various reasons – because of the end of the satellite lifetime and injection of the new satellites, because of the fact that the orbits of serviced satellites constantly alter as being affected by various perturbations, and because of the regression of the servicing satellites’ basing orbits relative to the orbits of the serviced ones under the influence of the same perturbing factors.

The orbital plane change cost amounts to the greater part of the total servicing manoeuvre cost. Therefore, to minimize this cost according to the technical solution offered here, the servicing facilities are distributed on basing orbits, with each orbit assigned to its own servicing region. The nodal regression rate is equal for all the basing orbits. In general, these basing orbits are elliptical (being circular case), with different values of semi-major axis, eccentricity, and inclination (all three of these parameters, or any pairwise combinations of them). The planes of the basing orbits are distributed in space by ascending node longitudes in accordance with their servicing regions. The servicing satellites can be of single use, as well as returnable to the orbital station for the repeated use.

The cost of changing the orbital plane accounts for the majority of the total cost of a maintenance maneuver. For low orbits, changing the inclination of the orbit by one degree requires about 130 m/s. Thus, the serviced object must be in an orbit which inclination differs by no more than a few degrees. On the other hand, the longitude of the ascending node of the target’s orbit can differ by tens of degrees [3]. To minimize the cost of changing the orbit, according to the technical solution proposed here, the facilities are distributed over the base orbits, with each orbit assigned to its own service area.

The fact, that all the basing orbits have equal nodal regression rate, allows minimizing one-time delta-V (fuel) cost of servicing satellites on arbitrary “non-clustered” orbits by limiting required angle of the servicing satellite’s orbital plane change (at most half an angle between the neighbouring orbital planes).

It should be mentioned that implementation of this method for the formation of servicing facilities constellation is not multi-purpose. It could be expediently used in cases when artificial “clustering” of the satellite formation leads to the performance

losses in fulfilling the mission objectives of the satellites. Although in cases when we deal with the satellite servicing within historically developed orbital clusters, it is reasonable to distribute the servicing facilities upon the orbits which would be close to the ones of the serviced satellites, as it was described above. This would minimize the cost required for the change of the orbital plane.

3.4. Standards, interfaces and building blocks

Modular approaches are most likely the holy grail when talking “enabling” OOS² [8; 9]. Servicing and serviceable space infrastructure all the way to mega constellations would benefit from standards. Manifold efforts have been undertaken over several decades aiming at introducing modular spacecraft, standard interfaces, building blocks or other plug and play elements. However, there are still no such standards. This is for many reasons, but in recent years some more generic propositions have been made and investigated.

The above-mentioned iBOSS concept (Figure 7) is worthwhile mentioning as it represents a novel approach towards passive OOS and universal applicability (there are numerous papers other information available).

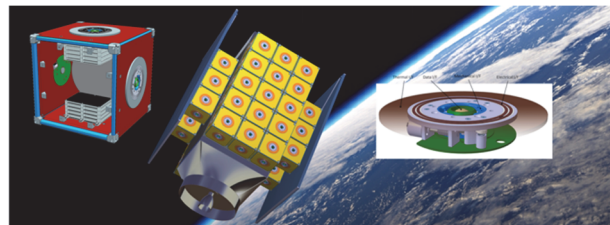


Figure 7. iBOSS Concept

In brief: iBOSS foresees a catalogue of standard functional building blocks (iBLOKCs, Figure 8) which are connected via an intelligent space system interface iSSI (4-in-1 interface: mechanical, power, data, thermal, Figure 9) and can be used in different ways, as standalone, e.g. hosted payload, experiment box or can be combined to an entire satellite (iSAT, Figure 10).

iBOSS also involves end-to-end software tools for fast-track design (iCADS – intelligent computer aided satellite design) and a full simulation environment (VTi – virtual testbed iBOSS).

² iBOSS – On Orbit Servicing Concept Video. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=uvEoC0ifz7Y> (accessed: 12.12.2022).

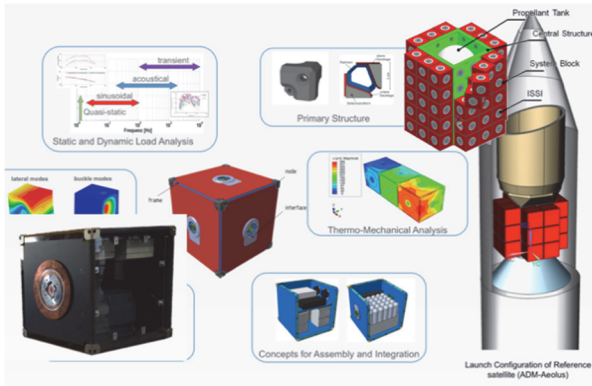


Figure 8. iBLOCK

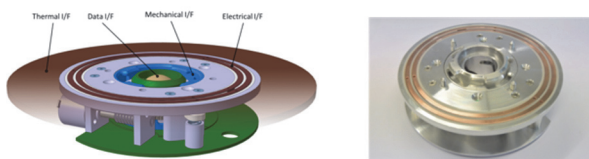


Figure 9. ISSI

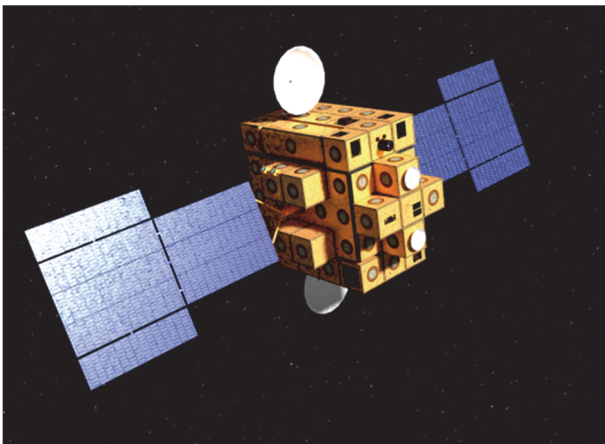


Figure 10. iSAT

Hence, iBOSS is a good example of a technology and plug and play approach supporting OOS across the board once established and introduced.

There are also other projects addressing similar features as i.e. Satlets and PACs (ref. Arkysis, Novawurks, DARPA).

4. Economic and jurisdictional aspects

The economic benefit is obvious. Servicing allows extending operational lifetime of satellites and thus gaining more time for revenue generation and reducing lifecycle cost. Salvaging systems that can

still be repaired, up to their return to Earth, could be another such benefit. These effects could be achieved not only through refuelling and repairing but also through orbit modification assistance.

Clearing operational space by removing out-of-service satellites from highly populated areas (for example in GEO) opens new opportunities for satellite injection. Promoting space safety may one day lead to the outburst of space tourism.

On orbit servicing creates a prospect of establishing a commercial servicing and debris-removing network.

On the other hand, international space law needs to be revised to allow all these promising opportunities. Current international space law is not exactly favourable for some aspects of on-orbit servicing and space debris removal. For example, owners of a satellite must authorize removal of all debris resulting from the launch thereof. Other complications that concern insurance policy and other aspects of law hinder otherwise desirable operations making them almost impossible even with all the required technology developed and approved.

Standardization could also meet with some obvious difficulties. It is obvious that unified interfaces are not the best option for some of the space market players.

5. International cooperation

After all those challenges have been stated and reviewed, it is more obvious that only an international alliance could endeavour to solve all the problems that are sure to come our way.

International cooperation is necessary for creating a serviceable space infrastructure.

Cooperation is expected to happen on all the levels. They include the following:

- 1) technological – which means a combination of best technologies from countries that are the most experienced in their specific fields;
- 2) experimental – that implies providing a training ground to international partners. Conducting real space experiments within the framework of global projects;
- 3) scientific – that means bringing together international research teams;
- 4) operational – data exchange and cooperative measurements;
- 5) law-related activities – international community may have to unite in a joint effort to establish convenient laws and promote standardization.

Conclusion

Both sides of the servicing process must be modified: both satellites must be made more serviceable, and the servicing spacecraft must be upgraded.

Servicing formation for optimal rendezvous flyby is one of the key elements of the future space systems and must be implemented regarding the serviced constellations.

The most underdeveloped technologies required for efficient on-orbit servicing are those connected with automated robotic operations. However, their role is ever increasing.

At this stage, international space laws do not fully facilitate cooperation and standardization.

International cooperation is an indispensable element of future and present space exploration.

On-orbit servicing leads to considerable economic benefits. Additional benefits of on-orbit-servicing are:

- the creation of a new high-tech industrial and manufacturing base with benefits today and far into future;

- opportunities of training and advanced education to the existing labour force and many new permanent employment positions.

References

1. Razoumny YN, Spencer DB, Agrawal B, Kreisel J, Yasaka T, Koupreev SA, Razoumny V, Makarov Y. The concept of on-orbit-servicing for next generation space system development and its key technologies. *Proceedings of the International Astronautical Congress*. 2017;16:10486–10499

2. Yasaka T. Space structure – Yesterday, today and tomorrow. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, Beijing, China*. 2013;7:5687–5694.

3. Baranov AA. *Spacecraft manoeuvring in the vicinity of a near-circular orbit*. Cambridge Scholars; 2022. Available from: <https://www.cambridgescholars.com/product/978-1-5275-8472-3> (accessed: 12.12.2022).

4. Petukhov V, Adilson PO. Optimization of the finite-thrust trajectory in the vicinity of a circular orbit. *IAA/AAS SciTech Forum 2019 on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials: Advances in the Astronautical Sciences Series*. 2021;174(95):5–15.

5. Baranov AA, Budyansky AA. Algorithm for calculation of the parameters of four maneuvers of a non-coplanar rendezvous in the vicinity of a circular orbit. *Cosmic Research*. 2022;60(6):491–501. <https://doi.org/10.1134/S0010952522060028>

6. Razoumny VYu, Baranov AA, Razoumny YuN. Satellite constellation design of on-orbit servicing space system for Globalstar satellites. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2019;20(2):111–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-111-122>

Разумный В.Ю., Баранов А.А., Разумный Ю.Н. Проектирование орбитального построения космической системы для обслуживания космических аппаратов системы Globalstar // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 111–122. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-111-122>

7. Sommer B. Novel space infrastructure concepts from LEO to GEO. *Proceedings of the 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation 'ASTRA 2006'*. Noordwijk: ESTEC; 2006. <https://doi.org/10.2514/6.IAC-06-D3.1.07>

8. Kortmann M, Rühl S, Kreisel J, Schervan T, Schmidt H, Dafnis A. Building block-based “iBOSS” approach: fully modular systems with standard interface to enhance future satellites. *IAC-15-D3.1.3, 66th International Astronautical Congress*. Jerusalem; 2015.

9. Kreisel J. On-orbit servicing of satellites (OOS): its potential market & impact. *Proceedings of the 7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation 'ASTRA 2002'*. Noordwijk: ESTEC; 2002.

About the authors

Yury N. Razoumny, Doctor of Sciences (Techn.), Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1337-5672, Scopus Author ID: 16647281300, eLIBRARY SPIN-code: 7704-4720; yury.razoumny@gmail.com

Andrey A. Baranov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, 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; leading researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, 4 Miusskaya Ploshchad', Moscow, 125047, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1823-9354, Scopus Author ID: 14059618600, eLIBRARY SPIN-code: 6606-3690; andrey_baranov@list.ru

Brij Agrawal, Professor, Distinguished Professor in the Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Naval Postgraduate School, 1 University Circle, Herrmann Hall 061A Monterey, CA 93943-5006, United States of America; Scopus Author ID: 7101837537; agrawalrudn@gmail.com

Arthur M. Dula, J.D. in Civil Law, space lawyer, The Law Office of Art Dula, 3106 Beauchamp, Houston, Texas 77009, United States of America; Scopus Author ID: 56989490200; art@dula.com

Joerg Kreisel, international consultant (JKIC), iBOSS GmbH, 25 Dennewartstrasse, Aachen, 52068, Federal Republic of Germany; Scopus Author ID: 16645823400; jk@jkic.de

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, Scopus Author ID: 57201885865, eLIBRARY SPIN-code: 2287-2902; 4997445962@mail.ru

David B. Spencer, PhD (Aerospace Engineering Sciences), Professor of the Department of Aerospace Engineering, Pennsylvania State University, 229 Hammond Building, University Park, PA 16802, United States of America; Scopus Author ID: 7401446117; dbs9@psu.edu

Vladimir Yu. Razoumny, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Mechatronics, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6373-4608, eLIBRARY SPIN-code: 6860-2153; vladimir.razoumny@gmail.com

Tetsuo Yasaka, Professor, IAA member, QPS Institute, Fukuoka, Japan; Scopus Author ID: 7005801010; tyasaka@nifty.com

Сведения об авторах

Разумный Юрий Николаевич, доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, директор департамента механики и мехатроники, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-1337-5672, Scopus Author ID: 16647281300, eLIBRARY SPIN-код: 7704-4720; yury.razoumny@gmail.com

Баранов Андрей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, профессор департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ведущий научный сотрудник, Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша, Российская академия наук, Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4; ORCID: 0000-0003-1823-9354, Scopus Author ID: 14059618600, eLIBRARY SPIN-код: 6606-3690; andrey_baranov@list.ru

Агравал Бридж, заслуженный профессор кафедры машиностроения и аэрокосмической техники, Военно-морская школа, 1 University Circle, Herrmann Hall 061A, Monterey, CA 93943-5006, Соединенные Штаты Америки; Scopus Author ID: 7101837537; agrawalrudn@gmail.com

Дула Артур М., доктор гражданского права, юрист по космическому праву, адвокатское бюро Art Dula, 3106 Beauchamp, Хьюстон, Техас, 77009, Соединенные Штаты Америки; Scopus Author ID: 56989490200; art@dula.com

Крайзель Йорг, международный консультант в области космоса, iBoss GmbH, Федеративная Республика Германия, 52068, Ахен, Dennewartstrasse 25; Scopus Author ID: 16645823400; jk@jkic.de

Купреев Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор департамента механики и мехатроники, 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; kupreevsa@rudn.ru

Спенсер Дэвид Б., кандидат наук в области аэрокосмических инженерных наук, профессор кафедры аэрокосмической техники, Пенсильванский государственный университет, 229 Hammond Building, University Park, PA 16802, Соединенные Штаты Америки; Scopus Author ID: 7401446117; dbs9@psu.edu

Разумный Владимир Юрьевич, кандидат технических наук, доцент департамента механики и мехатроники, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-6373-4608, eLIBRARY SPIN-код: 6860-2153; vladimir.razoumny@gmail.com

Ясака Тэцую, профессор, Институт пионеров космоса Q-shu, Фукуока, Япония; Scopus Author ID: 7005801010; tyasaka@nifty.com



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-283-292
UDC 629.78


Research article / Научная статья

Coplanar multi-turn rendezvous in near-circular orbit using a low-thrust engine

Andrey A. Baranov^a , Adilson P. Olivio^b  

^aKeldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

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

 pedrokekule@mail.ru

Article history

Received: September 27, 2022

Revised: November 25, 2022

Accepted: November 28, 2022

Keywords:

spacecraft, calculation of maneuver parameters, space object, low-thrust engine, circular orbit, velocity impulse

Abstract. The authors describe an algorithm that allows calculating the parameters of maneuvers performed on several turns by the low-thrust engine, which ensure the flight of the active spacecraft to the specified vicinity of the target space object. The movement takes place in the vicinity of a circular orbit. Linearized equations of motion are used in solving the problem. The influence of the non-centrality of the gravitational field and the atmosphere is not taken into account. The determination of maneuver parameters takes place in three stages. At the first and third stages, the parameters of the pulse transition and the transition performed by the low-thrust engine, are determined analytically. At the second stage, the distribution of maneuvering between turns, which provides a solution to the meeting problem, is carried out by iterating over one variable. This method of solving the problem provides simplicity and high reliability of determining the parameters of maneuvers, which allows it to be used on board the spacecraft. The paper investigates the dependence of the total characteristic speed of solving the meeting problem on the number of turns of the flight and the magnitude of the engine thrust.

For citation


Baranov A.A., Olivio A.P. Coplanar multi-turn rendezvous in near-circular orbit using a low-thrust engine. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):283–292. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-283-292>

Компланарная многовитковая встреча на околокруговой орбите с помощью двигателей малой тяги

А.А. Баранов^a , А.П. Оливьо^b  

^aИнститут прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва, Российская Федерация

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 pedrokekule@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 27 сентября 2022 г.

Доработана: 25 ноября 2022 г.

Принята к публикации: 28 ноября 2022 г.

Аннотация. Описан алгоритм, позволяющий рассчитать параметры маневров, исполняемых на нескольких витках двигателем малой тяги, обеспечивающих перелет активного космического аппарата в заданную окрестность целевого космического объекта. Движение происходит в



Ключевые слова:

космический аппарат, расчет параметров маневров, космический объект, малая тяга, круговая орбита, импульс скорости

окрестности круговой орбиты. При решении задачи используются линеаризованные уравнения движения. Влияние нецентральной гравитационного поля и атмосферы не учитываются. Определение параметров маневров происходит в три этапа. На первом и третьем этапах параметры импульсного перехода и перехода, выполняемого двигателем малой тяги, определяются аналитически. На втором этапе распределение маневрирования между витками, обеспечивающее решение задачи встречи, осуществляется перебором по одной переменной. Данный метод решения задачи прост и гарантирует высокую надежность определения параметров маневров, что позволяет использовать его на борту космического аппарата. Исследуется зависимость суммарной характеристической скорости решения задачи встречи от числа витков перелета и величины тяги двигателя.

Для цитирования

Baranov A.A., Olivio A.P. Coplanar multi-turn rendezvous in near-circular orbit using a low-thrust engine // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 283–292. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-283-292>

Introduction

The problem of the meeting in a near-circular orbit using a low-thrust engines is of great importance in the practice of spacecraft (SC) flights. This problem is solved during the rendezvous and docking of spacecraft, the implementation of a group flight of several spacecraft, the formation of a given configuration of satellite systems, the removal of space debris, and maintenance of the spacecraft.

Over the past sixty years, the problem of the meeting has been considered in the papers of many authors. Particular attention was paid to the problem of rendezvous in near-circular orbits, when maneuvers are performed by high-thrust engines. A problem of this type was encountered most often in practical paper.

As the first notable papers in this area, we can note the papers of J.E. Prussing [1], who studied the problem of a meeting with a duration of no more than three turns for the case of two circular coplanar orbits, and J.-P. Marec [2], who solved the classical problem of a meeting of average duration in near-circular orbits.

Currently, three main approaches to solving complex multi-impulse problems of spacecraft maneuvering are widely used. In the first case, the problem of maneuvering in the plane of the orbit and the problem of turning the plane of the orbit are solved independently of each other. A similar scheme was used, in particular, to implement the Shuttle rendezvous with the orbital station¹, to control the move-

ment of geostationary satellites [3], satellites included in satellite systems [4], etc. The advantage of such a scheme is its simplicity and reliability, the disadvantage is the excessive costs of the total characteristic speed for maneuvering.

In the second case, numerical methods are used to find the optimal solution to the most complex multi-impulse problems, taking into account a wide range of restrictions [5; 6]. Most often, the simplex method is used to calculate the parameters of maneuvers [7; 8].

In the third method, at the first stage, using the solution of the Lambert problem, the parameters of the two-impulse solution of the meeting problem are determined. Then the behavior of the hodograph of the basis vector corresponding to the found solution is analyzed, and, if necessary, additional velocity impulses are added to obtain the optimal solution. This approach was first applied in the papers of Lion and Handelsman [9], Jezewski and Roosendaal [10].

There are also methods that are at the junction of different approaches. For example, in papers [11; 12] proposed numerical-analytical methods for solving the multi-impulse meeting problem, combining the advantages of the first and second of the previously listed approaches. They allow using the results obtained in the early papers of T. Edelbaum [13], J.-P. Marec [2], when solving modern practical problems.

Since the 1960s, the process of using electric rocket engines (ERE) on spacecraft has begun. Due to the high specific impulse, EREs can significantly reduce fuel costs for orbital maneuvering. However, the small (compared to traditional liquid rocket engines) thrust of the ERE leads to the need to take into account their long-term operation.

¹ Shuttle Press Kit: STS-92. Available from: https://historycollection.jsc.nasa.gov/JSCHistoryPortal/history/shuttle_pk/pk/Flight_100_STS-092_Press_Kit.pdf (accessed: 17.08.2022).

Problems of this type occupy a special place among the problems of optimal spacecraft maneuvering. A significant number of papers have been devoted to them, several very interesting monographs have been published [14; 15]. Particularly noteworthy are the papers of V.G. Petukhov [16], Petukhov and Olivio [17] and [18; 19]. Due to the complexity of the problems in which it is assumed that maneuvering is carried out using low-thrust propulsion systems, they have traditionally been solved by numerical methods using the Pontryagin maximum principle or the continuation method. In recent years, to solve problems with a large extent of maneuvers, Yu.P. Ulybyshev successfully uses the interior point method [20].

In the method considered in this paper, the meeting problem is solved both in an impulse setting and taking into account the long-term operation of a low-thrust engine.

To analyze the relative motion of a spacecraft in the vicinity of circular orbits, it is necessary to use special mathematical models of motion. The most popular mathematical model of the relative motion of spacecraft in the vicinity of circular orbits is the Hill – Clohessy – Wiltshire (HCW) model. Linearized differential equations for the relative motion of a spacecraft in the vicinity of a circular orbit for the rendezvous and docking problem were obtained by Clohessy – Wiltshire in 1960 [21], but as early as the 19th century, similar equations were used by Hill in his theory of the motion of the Moon [22]. In this mathematical model, to obtain the equations of relative motion, a rotating (orbital) coordinate system and linearization of differential equations of relative motion are used, based on the assumption that the distance between the considered spacecraft is small compared to the average radius of the orbit. In this paper, we use linearized equations obtained by P.E. Elyasberg [23].

Due to the increase in the number of maneuvering SC, the increase in the efficiency of solving problems, at present there is a tendency to transfer the process of calculating maneuvers on board the spacecraft. This leads to the need to simplify the process of calculating the parameters of maneuvers and increase.

1. Formulation of the meeting problem

The problem of calculating the parameters of flight maneuvers between close near – circular orbits is solved in an approximate impulse formulation, within the framework of the unperturbed Keplerian motion.

The flight conditions using N velocity impulse in a fixed time from the initial orbit to a given point

of the final orbit (meeting problem) in linear approximation can be written as [12]:

$$\sum_{i=1}^N (\Delta V_{ri} \sin \varphi_i + 2\Delta V_{ti} \cos \varphi_i) = \Delta e_x; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N (-\Delta V_{ri} \cos \varphi_i + 2\Delta V_{ti} \sin \varphi_i) = \Delta e_y; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N 2\Delta V_{ti} = \Delta a; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N (2\Delta V_{ri} (1 - \cos \varphi_i) + \Delta V_{ti} \times (-3\varphi_i + 4\sin \varphi_i)) = \Delta t, \quad (4)$$

where $\Delta e_x = e_f \cos \omega_f - e_0 \cos \omega_0$; $\Delta e_y = e_f \sin \omega_f - e_0 \sin \omega_0$; $\Delta a = (a_f - a_0) / r_0$; $\Delta t = \lambda_0(t_f - t_0)$; $\Delta V_{ti} = \Delta V_{ti}^* / V_0$; $\Delta V_{ri} = \Delta V_{ri}^* / V_0$; $f, 0$ – indices corresponding to the final and initial orbits; e_f, e_0 – eccentricities of the orbits; a_f, a_0 – semi-major axes of the orbits; ω_f, ω_0 – angles between the direction to the pericenter of the corresponding orbit and the direction to the point specified on the final orbit (the axis Ox is directed to this point); t_f – the necessary arriving time to this point; t_0 – time at which, when moving in the initial orbit, the projection of the radius-vector in the plane of the final orbit falls on a beam passing through a given meeting point; V_0, λ_0 – orbital and angular velocities along the reference circular orbit of radius r_0 ($r_0 = a_f$); N – number of velocity impulse; φ_i – angle of application of the i -th velocity impulse, calculated from the direction to the given meeting point towards the motion of the SC; $\Delta V_{ti}^*, \Delta V_{ri}^*$ – transversal and radial components of the i -th velocity impulse respectively.

It must be taken into consideration that the angles φ_i – are negative, i.e., because it was assumed that $\varphi_f = 0$ at the given point.

The problem of finding the parameters of optimal maneuvers can be formulated as follows: it's necessary to determine $\Delta V_{ri}, \Delta V_{ti}, \varphi_i$ ($i = 1, \dots, N$), at which the total characteristic velocity of maneuvers ΔV is minimal

$$\Delta V = \sum_{i=1}^N \Delta V_i = \sum_{i=1}^N \sqrt{\Delta V_{ri}^2 + \Delta V_{ti}^2}$$

при ограничениях (1)–(4).

2. Algorithm for solving the transfer problem

When solving the problem of transfer between coplanar orbits, the first three equations of system (1)–(4) are used.

There are three types of solutions for which the necessary optimality conditions are satisfied:

a) on the μ, λ plane, the hodograph of the basis vector is an *ellipse*, the center of which is located on the μ axis, but is shifted from the origin of the coordinate system; the ellipse is tangent to a circle of unit radius at a point on the μ axis;

b) the hodograph of the basis vector degenerates into a *point* coinciding with the point of intersection of a circle of unit radius with the μ axis;

c) the hodograph of the basis vector – an *ellipse* centered at the origin of the coordinate system, touching the circle at *two* points on the μ axis.

Since all possible optimal solutions have $\lambda = 0$, and $\mu \neq 0$, then the velocity impulses of these solutions are purely transversal.

Assuming that the velocity impulses are applied at the optimal points for correcting the eccentricity vector,

$$\operatorname{tg} \varphi_e = \frac{\Delta e_y}{\Delta e_x}; \quad \varphi_1 = \varphi_e; \quad \varphi_2 = \varphi_1 + \pi,$$

we find the magnitude of the velocity impulses of the optimal solution:

$$\Delta V_{i1} = \frac{1}{4}(\Delta a + \Delta e). \quad (5)$$

$$\Delta V_{i2} = \frac{1}{4}(\Delta a - \Delta e). \quad (6)$$

3. Algorithm for solving the meeting problem

When solving the meeting problem, the values of the velocity impulses $\Delta V_{i1}, \Delta V_{i2}$, determined when solving the transition problem, are distributed among N turns allowed for maneuvering:

$$\Delta V_{1t} = \sum_{i=1}^N \Delta V_{1ti}; \quad (7)$$

$$\Delta V_{2t} = \sum_{i=1}^N \Delta V_{2ti}, \quad (8)$$

where N is the number of turns on which maneuvering is allowed.

The further goal is to choose such a distribution of the magnitudes of the velocity impulses over the coils so that equation (4) is satisfied.

To significantly simplify the solution of the problem, we assume that the magnitudes of the velocity impulses along the turns change linearly:

$$\Delta V_{1ti} = \Delta V_{1t1} + (\Delta V_{1tN} - \Delta V_{1t1})(i - 1) / (N - 1); \quad (9)$$

$$\Delta V_{2ti} = \Delta V_{2t1} + (\Delta V_{2tN} - \Delta V_{2t1})(i - 1) / (N - 1), \quad (10)$$

where $\Delta V_{1t1}, \Delta V_{1tN}$ and $\Delta V_{2t1}, \Delta V_{2tN}$ are the value of the velocity of impulses on the first and last allowed turns of maneuvering, which is part of the first and second velocity of solving the transfer problem.

Substituting the values of the velocity impulses calculated by formulas (9), (10) into (7) and (8) we get:

$$\Delta V_{1t} = \sum_{i=1}^N \Delta V_{1ti} = 0.5N(\Delta V_{1t1} + \Delta V_{1tN}); \quad (11)$$

$$\Delta V_{2t} = \sum_{i=1}^N \Delta V_{2ti} = 0.5N(\Delta V_{2t1} + \Delta V_{2tN}). \quad (12)$$

Using (11) and (12), we obtain formulas for determining $\Delta V_{1tN}, \Delta V_{2tN}$:

$$\Delta V_{1tN} = \frac{\Delta V_{1t}}{0.5N} - \Delta V_{1t1}; \quad (13)$$

$$\Delta V_{2tN} = \frac{\Delta V_{2t}}{0.5N} - \Delta V_{2t1}. \quad (14)$$

Substituting the found values $\Delta V_{1tN}, \Delta V_{2tN}$ into formulas (9) and (10), we obtain:

$$\Delta V_{1ti} = 2\Delta V_1(i-1) / N(N-1) + \Delta V_{1t1} \left[1 - \frac{2(i-1)}{N-1} \right]; \quad (15)$$

$$\Delta V_{2ti} = 2\Delta V_2(i-1) / N(N-1) + \Delta V_{2t1} \left[1 - \frac{2(i-1)}{N-1} \right]. \quad (16)$$

Thus, we found the values of all impulses of velocity, expressed only through ΔV_{1t1} and ΔV_{2t1} . Substituting them into equation (3), we obtain a linear equation with two unknowns ΔV_{1t1} , ΔV_{2t1} . The coefficients for velocity impulses are known, since their application angles are known:

$$\varphi_{1i} = \varphi_e + 2\pi(N_i - N); \quad (17)$$

$$\varphi_{2i} = \varphi_e + \pi + 2\pi(N_i - N). \quad (18)$$

Going through the value of the variable ΔV_{1t1} , within the given limits, for each value from equation (3) we find the value of the variable ΔV_{2t1} .

Then, using (15) and (16), we find the values of all velocity impulses. Adding the modules of all velocity impulses, we find the total characteristic velocity of the next solution. The solution for which the total characteristic velocity is minimal is taken as a solution to the meeting problem. If the total characteristic velocity of the found solution coincides with the total characteristic velocity of the solution to the transition problem, then a solution was found with the minimum possible total characteristic velocity.

At the next stage, we estimate the duration of each of the found maneuvers.

The duration of each of the maneuvers is estimated using the ratio:

$$\Delta\varphi_i = \frac{w_c}{w} \Delta V_i, \quad (19)$$

where w_c – the centripetal acceleration of the reference circular orbit $\left(w_c = \frac{V_0^2}{r_0} \right)$; w – the acceleration

created by the propulsion system $\left(w = \frac{P}{m} \right)$; m – the mass of the active SC; P – thrust of its engine.

If the duration of the largest velocity impulse doesn't exceed 20° , then the solution is close to the

impulse one and we consider that the problem has been solved. If the duration of the maneuvers is significant, then we proceed to the solution with low thrust.

4. Solving the problem with “low thrust”

For each turn, we find what changes in the eccentricity and the semi-major axis produce velocity impulses determined on this turn

$$\Delta e_i = 2\Delta V_{1ti} - 2\Delta V_{2ti}; \quad (20)$$

$$\Delta a_i = 2\Delta V_{1ti} + 2\Delta V_{2ti}. \quad (21)$$

Then we determine the required duration of low-thrust maneuvers, which will produce the same change in these elements:

$$4 \sin \frac{\Delta\varphi_{1i}}{2} - 4 \sin \frac{\Delta\varphi_{2i}}{2} = \frac{w_c \Delta e_i}{w};$$

$$2\Delta\varphi_{1i} + 2\Delta\varphi_{2i} = \frac{w_c \Delta a_i}{w}. \quad (22)$$

From system (22) one can find the quantities $\Delta\varphi_{1i}$, $\Delta\varphi_{2i}$ [24]:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{w_c \Delta a}{4wn} + 2 \arcsin \frac{w_c \Delta e}{8wn \cos \frac{w_c \Delta a}{8wn}};$$

$$\Delta\varphi_2 = \frac{w_c \Delta a}{4wn} - 2 \arcsin \frac{w_c \Delta e}{8wn \cos \frac{w_c \Delta a}{8wn}}. \quad (23)$$

Thus, turn by turn, we find the duration of all maneuvers. The problem with low thrust is correctly solved. If the argument of the arcsine is greater than 1, then there is no solution (with the available thrust and mass of the spacecraft, it is impossible to solve the rendezvous problem for a given number of turns).

The found solution with “low thrust” gives the same change in the semi-major axis and the eccentricity vector as the original impulse solution. Equation (4) is also quite accurate, since the middle of long maneuvers coincides with the moments of ap-

plication of velocity impulses, and the same change in the major axis on the turn is made, therefore, the required time of arrival at the meeting point is provided.

5. Iterative procedure

In the formulated meeting problem, linearized equations of motion are used, the non-centrality of the gravitational field, the influence of the atmosphere, etc. are not taken into account. This leads to the fact that the actual accuracy of the fulfillment of the terminal conditions in the system (1)–(6) will be insufficient. To solve the problem with a given accuracy, you can use the iterative scheme [5; 6], which consists of the following steps:

1. At the beginning of the next iteration, the “approximate” problem is solved: under the previously accepted simplifying assumptions, the parameters of the maneuvers that ensure the formation of the “target” orbit are determined (at the first iteration, the “target” orbit coincides with the final orbit).

2. Then, taking into account the calculated velocity impulses, using the models of all necessary disturbances, an “accurate” prediction of the spacecraft motion is carried out and the parameters of the formed orbit are found.

3. The deviations of the parameters of the formed orbit from the corresponding parameters of the final orbit are calculated.

4. If the deviations exceed the allowable values, then the parameters of the “target” orbit are changed by the value of the calculated deviations, and the next iteration is carried out.

5. The procedure ends when the terminal conditions are met with the specified accuracy.

6. For “accurate” forecasting, as a rule, numerical and/or high-precision numerical-analytical integration is used. It is possible to use different forecasting methods at different iterations, but the accuracy of the forecast should increase with the number of the current iteration.

7. Numerical integration takes into account the influence of non-centrality of the gravitational field, atmosphere, light pressure, etc., the operation of the spacecraft engines is accurately modeled, therefore, in spite the fact that the maneuver parameters and are found at each iteration using the simplest motion

model, but as a result of the iterative procedure, they provide access to the final orbit with the required accuracy.

6. Problem solving examples

Considering the motion of a spacecraft (SC) relative to the point O, moving along a non-perturbed near-circular orbit with a radius of 6871 km. Let’s take the gravitational parameter of the Earth equal to $3.9860044 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$. Consider the problem of a flight with the help of N impulses of velocity in a fixed time from the initial orbit to a given point of the final orbit from a point in phase space $r_0 = (10, 100, -5) \text{ km}$, $v_0 = (1, -10, 3) \text{ m/s}$ to the origin, i.e. to the point $r_f = (0, 0, 0) \text{ km}$, with a velocity $v_f = (0, 0, 0) \text{ m/s}$. For the problem, we’ll take the initial mass of the SC equal to 1000 kg, the specific impulse of the SC propulsion system is 220 seconds (2157.463 m/s), and the thrust (T) will be varied in the range from 0.362 to 100 N. The flight is carried out in $N = 4$ and 13 turns.

Double impulse transfer. In the Table 1 shows the results of the calculation the parameters of a two-impulse transfer between coplanar orbits, that is, the magnitude of the transversal components of the velocity impulses, the angles of application of the first and second impulses, as can be seen, the minimum value of the characteristic velocity that a SC must have for the transfer maneuver, is 4.485 m/s.

Multi-impulse solution. The value of the first velocity impulse is moved within the limits from -2.785 to 0.5 m/s with a step of 0.024 m/s .

Parameters of the optimal solutions. In the Tables 2–4 show the parameters of the optimal solution, that is, the values of the velocity impulses on the turns for the cases when $N = 4$ and 13.

Solution of the problem with low thrust. In the Tables 5, 6 and 7 shown the results of calculating the problem with low thrusts “Thrust = 1 and Thrust = 0.362”, that is, the values of the velocity impulses and the duration of maneuvers on turns for cases when $N=4$ and 13. In some cases, there’re no solutions because the value of the arcsine argument is out of range $(-1; 1)$. With increased thrust, the duration of the maneuvers is reduced, and the costs of the total characteristic velocity (CXC) of the low thrust solution during thrust increment, coincides with costs of the CXC of the impulse solution.

Table 1

Results of the calculation the parameters of the coplanar transfer problem

$\Delta V_1, \text{m/s}$	$\Delta V_2, \text{m/s}$	$ \Delta V , \text{m/s}$	φ_e°	φ_1°	φ_2°
-2.785	1.7	4.485	6.4	186.4	366.4

Table 2

Parameters of the optimal solution for $N = 4$

N	$\Delta V_{1i}, \text{m/s}$	$\Delta V_{2i}, \text{m/s}$	$ \Delta V_{1i} + \Delta V_{2i} , \text{m/s}$
1	-0.024	0.848	0.872
2	-0.472	0.566	1.038
3	-0.92	0.284	1.204
4	-1.369	0.002	1.371
Σ	-2.785	1.7	4.485

Table 3

Parameters of the optimal solution for $N = 13$

N	$\Delta V_{1i}, \text{m/s}$	$\Delta V_{2i}, \text{m/s}$	$ \Delta V_{1i} + \Delta V_{2i} , \text{m/s}$
1	-0.001	0.199	0.2
2	-0.037	0.187	0.224
...
12	-0.392	0.074	0.466
13	-0.427	0.063	0.49
Σ	-2.785	1.7	4.485

Table 4

Results of the calculation of the problem with low thrust, for $N = 4$

T, N	0.362	0.37	0.4	0.5	1	2	5	10	100
$\Delta\varphi^\circ$	There is not solution	There is not solution	There is not solution	There is not solution	300.137	144.199	57.082	28.499	2.849
$\Delta V, \text{m/s}$	There is not solution	There is not solution	There is not solution	There is not solution	4.726	4.541	4.494	4.487	4.485

Table 5

Results of the calculation of the problem with low thrust "Thrust = 1", for $N = 4$

N	$\Delta V_{1i}, \text{m/s}$	$\Delta V_{2i}, \text{m/s}$	$ \Delta V_{1i} + \Delta V_{2i} , \text{m/s}$	$\Delta\varphi_{1i}^\circ$	$\Delta\varphi_{2i}^\circ$	$(\Delta\varphi_{1i} + \Delta\varphi_{2i})^\circ$
1	-0.04	0.864	0.904	-2.561	54.87	57.431
2	-0.48	0.573	1.053	-30.473	36.424	66.897
3	-0.942	0.306	1.248	-59.841	19.434	79.275
4	-1.443	0.077	1.52	-91.65	4.884	96.534
Σ	-2.905	1.82	4.725	-184.525	115.612	300.137

Table 6

Results of the calculation of the problem with low thrust, for $N = 13$

T, N	0.362	0.37	0.4	0.5	1	2	5	10	100
$\Delta\varphi^\circ$	809.865	791.329	728.952	578.15	285.884	142.555	56.979	28.487	2.849
$\Delta V, \text{m/s}$	4.616	4.61	4.591	4.551	4.501	4.489	4.486	4.485	4.485

Table 7

Results of the calculation of the problem with low thrust "Thrust = 0.362", for $N = 13$

N	$\Delta V_{1i}, \text{m/s}$	$\Delta V_{2i}, \text{m/s}$	$ \Delta V_{1i} + \Delta V_{2i} , \text{m/s}$	$\Delta\varphi_{1i}^\circ$	$\Delta\varphi_{2i}^\circ$	$(\Delta\varphi_{1i} + \Delta\varphi_{2i})^\circ$
1	-0.003	0.2	0.203	-0.45	35.149	35.599
2	-0.038	0.189	0.227	-6.642	33.117	39.759
...
12	-0.405	0.087	0.492	-71.015	15.253	86.268
13	-0.444	0.08	0.524	-77.953	13.967	91.92
Σ	-2.85	1.765	4.615	-500.114	309.751	809.865

Conclusion

In the paper describes an algorithm for calculating the parameters of a multi-turn multi-impulse encounter. The main advantage of the proposed algorithm is its simplicity and reliability, which makes it possible to use it not only in ground control centers, but also on board the spacecraft. Simultaneously, this algorithm makes it possible to obtain the optimal solution of the problem in the case when the initial phase belongs to the optimal phase range and the total characteristic velocity of the solution of the meeting problem coincides with the total characteristic velocity of the optimal solution of the transfer problem. The algorithm makes it possible to obtain a solution even when the maneuvers are performed by low thrust engines. The examples given in the paper confirm the operability of this algorithm and the high quality of the resulting solution.

References

1. Prussing JE. Optimal two- and three-impulse fixed-time rendezvous in the vicinity of a circular orbit. *AIAA Journal*. 1970;8(7):46–56. <https://doi.org/10.2514/3.5876>
2. Marec JP. Optimal space trajectories. *Studies in Astronautics* (vol. 1). Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Sci. Pub. Co.; 1979.
3. Bulynin YuL. Ballistic support for orbital motion control of geostationary spacecraft at various stages of operation. *System Analysis, Control and Navigation: Abstracts of Reports*. Crimea, Yevpatoria; 2008. p. 73–74. (In Russ.)
4. Rylov YuP. Control of a spacecraft entering the satellite system using electric rocket engines. *Kosmicheskie Issledovaniya*. 1985;23(5):691–700.
5. Kulakov AYu. Model and algorithms of reconfiguration of the spacecraft motion control system (dissertation of the candidate of Technical Sciences). St. Petersburg; 2017. (In Russ.)
6. Baranov AA. Algorithm for calculating the parameters of four-impulse transitions between close almost-circular orbits. *Cosmic Research*. 1986;24(3):324–327.
7. Lidov ML. Mathematical analogy between some optimal problems of trajectory corrections and selection of measurements and algorithms of their solution. *Kosmicheskie Issledovaniya*. 1971;9(5):687–706. (In Russ.)
8. Gavrilov V, Obukhov E. Correction problem with fixed number of impulses. *Kosmicheskie Issledovaniya*. 1980;18(2):163–172. (In Russ.)
9. Lion PM, Handelsman M. Basis-vector for pulse trajectories with a given flight time. *Rocket Technology and Cosmonautics*. 1968;6(1):153–160. (In Russ.)
10. Jezewski DJ, Rozendaal HL. An efficient method for calculating optimal free-space n-impulse trajectories. *AIAA Journal*. 1968;6(11):2160–2165. (In Russ.)
11. Baranov AA. Geometric solution of the problem of a rendezvous on close nearly circular coplanar orbits. *Cosmic Research*. 1989;27(6):689–697.
12. Baranov AA, Roldugin DS. Six-impulse maneuvers for rendezvous of spacecraft in near-circular noncoplanar orbits. *Cosmic Research*. 2012;50(6):441–448.
13. Edelbaum TN. Minimum impulse transfer in the vicinity of a circular orbit. *Journal of the Astronautical Sciences*. 1967;XIV(2):66–73.
14. Lebedev VN. *Calculation of the motion of a spacecraft with low thrust*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1968. (In Russ.)
15. Grodzovsky GL, Ivanov YuN, Tokarev VV. *Mechanics of low-thrust space flight*. Moscow: Nauka Publ.; 1966. (In Russ.)
16. Petukhov VG. Method of continuation for optimization of interplanetary low-thrust trajectories. *Cosmic Research*. 2012;50(3):249–261. (In Russ.)
17. Petukhov VG, Olivio AP. Optimization of the finite-thrust trajectory in the vicinity of a circular orbit. *Advances in the Astronautical Sciences*. 2021;174:5–15.
18. Baranov AA. *Maneuvering in the vicinity of a circular orbit*. Moscow: Sputnik+ Publ.; 2016. (In Russ.)
19. Baranov AA. *Development of methods for calculating parameters of spacecraft maneuvers in the vicinity of a circular orbit* (dissertation of the Doctor of Physical and Mathematical Sciences). Moscow; 2019. (In Russ.) Available from: <http://library.keldysh.ru/diss.asp?id=2019-baranov> (accessed: 12.08.2022).
20. Ulybyshev YuP. Optimization of multi-mode rendezvous trajectories with constraints. *Cosmic Research*. 2008;46(2):133–145. (In Russ.)
21. Clohessy WH, Wiltshire RS. Terminal guidance system for satellite rendezvous. *Journal of the Aerospace Sciences*. 1960;27(9):653–678. <https://doi.org/10.2514/8.8704>
22. Hill GW. Researches in lunar theory. *American Journal of Mathematics*. 1878;1:5–26.
23. Elyasberg PE. *Introduction to the theory of flight of artificial Earth satellites*. Moscow: Nauka Publ.; 1965. (In Russ.)
24. Baranov AA, Prado AFB, Razumny VY, Baranov Jr. Optimal low thrust transfers between close near-circular coplanar orbits. *Cosmic Research*. 2011;49(3):269–279. <https://doi.org/10.1134/S0010952511030014>

Список литературы

1. Prussing J.E. Optimal two- and three-impulse fixed-time rendezvous in the vicinity of a circular orbit // *AIAA Journal*. 1970. Vol. 8. Issue 7. Pp. 46–56. <https://doi.org/10.2514/3.5876>
2. Marec J.P. Optimal space trajectories // *Studies in Astronautics*. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Sci. Pub. Co., 1979. Vol. 1. 329 p.
3. Бульнин Ю.Л. Баллистическое обеспечение управления орбитальным движением геостационарных КА на различных этапах эксплуатации // 13 Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация»: тезисы докладов. Крым, Евпатория, 2008. С. 73–74.
4. Рылов Ю.П. Управление космическим аппаратом, входящим в спутниковую систему при помощи электроракетных двигателей // *Космические исследования*. 1985. Т. 23. № 5. С. 691–700.
5. Кулаков А.Ю. Модель и алгоритмы реконфигурации системы управления движением космического аппарата: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 156 с.
6. Baranov A.A. Algorithm for calculating the parameters of four-impulse transitions between close almost-circular orbits // *Cosmic Research*. 1986. Vol. 24. Issue 3. Pp. 324–327.
7. Лидов М.Л. Математическая аналогия между некоторыми оптимальными задачами коррекции траекторий и выбора состава измерений и алгоритмы их решения // *Космические исследования*. 1971. Т. 9. № 5. С. 687–706.
8. Гаврилов В.П., Обухов Е.В. Задача коррекции с ограничением на число импульсов // *Космические исследования*. 1980;18(2):163–172.
9. Лайон П.М., Хенделсмен М. Базис-вектор для импульсных траекторий с заданным временем перелета // *Ракетная техника и космонавтика*. 1968;6(1):153–160.
10. Ежески Д.Дж., Розендаал Х.Л. Эффективный метод расчета оптимальных N -импульсных траекторий полета в космическом пространстве // *Ракетная техника и космонавтика*. 1968. Т. 6. № 11. С. 138–145.
11. Baranov A.A. Geometric solution of the problem of a rendezvous on close nearly circular coplanar orbits // *Cosmic Research*. 1989. Vol. 27. Issue 6. Pp. 689–697.
12. Baranov A.A., Roldugin D.S. Six-impulse maneuvers for rendezvous of spacecraft in near-circular noncoplanar orbits // *Cosmic Research*. 2012. Vol. 50. Issue 6. Pp. 441–448.
13. Edelbaum T.N. Minimum impulse transfer in the vicinity of a circular orbit // *Journal of the Astronautical Sciences*. 1967. Vol. XIV. Issue 2. Pp. 66–73.
14. Лебедев В.Н. Расчет движения космического аппарата с малой тягой. М.: ВЦ АН СССР, 1968. 108 с.
15. Гродзовский Г.Л., Иванов Ю.Н., Токарев В.В. Механика космического полета с малой тягой. М.: Наука, 1966. 678 с.
16. Петухов В.Г. Метод продолжения для оптимизации межпланетных траекторий с малой тягой // *Космические исследования*. 2012. Т. 50. № 3. С. 258–270.
17. Petukhov V.G., Olívio A.P. Optimization of the finite-thrust trajectory in the vicinity of a circular orbit // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2021. Vol. 174. Pp. 5–15.
18. Баранов А.А. Маневрирование в окрестности круговой орбиты. М.: Спутник+, 2016. 512 с.
19. Баранов А.А. Разработка методов расчета параметров маневров космических аппаратов в окрестностях круговой орбиты: дис. ... д-р физ.-мат. наук. М., 2019. 304 с. URL: <http://library.keldysh.ru/diss.asp?id=2019-baranov> (дата обращения: 12.08.2022).
20. Улыбышев Ю.П. Оптимизация межорбитальных перелетов с малой тягой при ограничениях // *Космические исследования*. 2012. Т. 50. № 5. С. 403–418.
21. Clohessy W.H., Wiltshire R.S. Terminal guidance system for satellite rendezvous // *Journal of the Aerospace Sciences*. 1960. Vol. 27. Issue 9. Pp. 653–678. <https://doi.org/10.2514/8.8704>
22. Hill G.W. Researches in lunar theory // *American Journal of Mathematics*. 1878. Vol. 1. Pp. 5–26.
23. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1965. 540 с.
24. Баранов А.А., Прадо А.Ф.Б., Разумный В.Ю., Баранов А.А. Оптимальные переходы с малой тягой между близкими околосферическими компланарными орбитами // *Космические исследования*. 2011. Т. 49. № 3. С. 278–288.

About the authors

Andrey A. Baranov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher, Institute for Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, 4 Miusskaya Ploshchad', Moscow, 125047, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1823-9354, Scopus Author ID: 14059618600, eLIBRARY SPIN-code: 6606-3690; andrey_baranov@list.ru

Adilson Pedro Olivio, postgraduate, 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: 0000-0001-5632-3747, Scopus Author ID: 57223139496, eLIBRARY SPIN-code: 7628-6084; pedrokekule@mail.ru

Сведения об авторах

Баранов Андрей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша, Российская академия наук, Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4; ORCID: 0000-0003-1823-9354, Scopus Author ID: 14059618600, eLIBRARY SPIN-код: 6606-3690; andrey_baranov@list.ru

Оливио Адильсон Педро, аспирант, департамент механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-5632-3747, Scopus Author ID: 57223139496, eLIBRARY SPIN-код: 7628-6084; pedrokekule@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-293-301
УДК 536.2


Научная статья / Research article

Исследование теплофизических характеристик органической эмульсии

Д.Я. Баринов^{a,b}  , С.Ю. Шорстов^a 

^aВсероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ «Курчатовский институт»,
Москва, Российская Федерация

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

 rasmal@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 30 июля 2022 г.
Доработана: 27 октября 2022 г.
Принята к публикации: 30 октября 2022 г.

Ключевые слова:

теплопроводность, теплоемкость,
фазовый переход, стационарный метод

Аннотация. Для подбора нагревательного и холодильного оборудования, а также оптимизации компонентов производственной линии, предназначенной для переработки мясных полуфабрикатов, требуется детальная информация о зависимостях основных характеристик выпускаемой продукции. К таким характеристикам относятся физико-механические, теплофизические, технологические и мн. др. В исследовании приводятся методические основы измерений, подходы к подготовке образцов и результаты экспериментального изучения теплопроводности и удельной теплоемкости органической эмульсии. Проанализированы методы и лабораторное оборудование для проведения измерений с учетом объекта исследований. Особенностью изучаемого образца является переменный фракционный состав, а также наличие жидкой фазы в виде воды. Это приводит к невозможности использовать стандартные серийно выпускаемые оправки для образцов. Для исследования характеристик органической эмульсии выбраны метод стационарного теплового потока и метод дифференциальной сканирующей калориметрии. В результате установлен характер измерения удельной теплоемкости и теплопроводности в диапазоне температур от -5 до 90 °С. Удельная теплоемкость образца изменяется от 2800 до 4410 Дж/(кг·К), при этом наблюдался фазовый переход кристаллизации/плавления водяной фазы. Для его исключения использовался метод аппроксимации. Значения теплопроводности изменяются от 0,28 до 0,49 Вт/(м·К).

Для цитирования

Баринов Д.Я., Шорстов С.Ю. Исследование теплофизических характеристик органической эмульсии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 293–301. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-293-301>




Investigation of thermophysical characteristics of organic emulsion

Dmitry Ya. Barinov^{a,b} , Sergey Yu. Shorstov^a 

^aAll-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials of the National Research Center “Kurchatov Institute”,
Moscow, Russian Federation

^bBauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

 rasmal@mail.ru

Article history

Received: July 30, 2022

Revised: October 27, 2022

Accepted: October 30, 2022

Keywords:

thermal conductivity, heat capacity, thermophysical properties, phase transition, stationary method

Abstract. For the selection of heating and refrigeration equipment, as well as the optimization of the components of the production line intended for the processing of meat semi-finished products, detailed information on the dependencies of the main characteristics of the products is required. Such characteristics include physico-mechanical, thermophysical, technological and many others. The authors present the methodological foundations of measurements, approaches to sample preparation and the results of an experimental study of the thermal conductivity and specific heat capacity of an organic emulsion. The analysis of methods and laboratory equipment for measurements taking into account the object of research was carried out. The peculiarity of the sample under study is the variable fractional composition, as well as the presence of a liquid phase in the form of water. This makes it impossible to use standard commercially available mandrels for samples. To study the characteristics of the organic emulsion, the method of stationary heat flow and the method of differential scanning calorimetry were chosen. As a result of the research, the nature of the measurement of specific heat capacity and thermal conductivity in the temperature range from -5 to 90 °C. The specific heat capacity of the sample varies from 2800 to 4410 J/(kg·K), while a phase transition of crystallization/melting of the water phase was observed. The approximation method was used to exclude it. The values of thermal conductivity vary from $0,28$ to $0,49$ W/(m·K).

For citation

Barinov DYa, Shorstov SYu. Investigation of thermophysical characteristics of organic emulsion. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):293–301. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-293-301>

Введение

Одной из основных проблем пищевой промышленности является выбор материалов для проектирования систем производственной линии и подбор характеристик их компонентов, обеспечивающих необходимые температурные условия при производстве пищевых полуфабрикатов.

Современная производственная линия является сложным техническим устройством, для изготовления деталей и узлов которой применяется множество материалов. В настоящее время отечественными предприятиями выпускаются различные виды конструкционных сталей и сплавов на основе титана и алюминия¹. Многие из них

могут использоваться при изготовлении элементов производственных линий. На поверхность металлов для их защиты могут наноситься различные покрытия, такие как антиокислительные, теплозащитные, износостойкие и мн. др. [1; 2]. Пока не существует единого универсального правила, в соответствии с которым имеется возможность подобрать характеристики систем для решения конкретных практических задач, таких как переработка, измельчение, смешивание, приготовление, упаковка и т. д. при заданных температурно-временных условиях. К таким неизвестным параметрам компонентов следует отнести

тами и средами. Минлеспичемаш, 1982; СП 2.3.3.-001-98. Санитарные правила по выпуску, реализации, использованию материалов, изделий из полимерных и других синтетических материалов, предназначенных для контакта с пищевыми продуктами. СПб., 1998.

¹ РТМ 27-72-15–82. Машины и оборудование продовольственные. Порядок применения металлов, синтетических и других материалов, контактирующих с пищевыми продук-

мощности нагревателей и холодильников, производительность перекачивающих хладагент насосов, размеры лент транспортеров, частоты вращения редукторов и шнеков, объемы бункеров для хранения исходного сырья и готовой продукции и др. [3; 4].

Подбор характеристик компонентов систем невозможен без наличия комплексной информации о различных характеристиках полуфабрикатов, с которыми предполагается работать. Среди них стоит выделить механические, теплофизические, вязкостные и прочие, причем и в исходном состоянии полуфабриката, и после переработки. Стоит отметить, что большинство продуктов пищевой промышленности содержит в себе водяную фазу в том или ином виде, поэтому характеристики необходимо изучать как при нормальных и повышенных температурах, так и в замороженном виде. В настоящее время для производства кормов для животных перспективным является применение мясной эмульсии, изготовленной путем измельчения до пастообразного состояния различных видов мяса. От того, насколько оптимально подобраны компоненты производственной линии, зависят стоимость и продолжительность технологического процесса при производстве полуфабрикатов, а также стоимость конечного продукта для потребителя.

В случае оптимизации нагревательного и холодильного оборудования наиболее важными характеристиками исследуемого объекта являются теплофизические: теплоемкость и теплопроводность. В [5] приводятся результаты измерений различных видов мясных полуфабрикатов, в том числе широкого ассортимента фаршей. Экспериментальные данные, как правило, приводятся в диапазоне температур от 20 до 80 °С, что зачастую не охватывает весь интерес технологов. Так, подбор холодильного оборудования требует набора знаний о фазовом переходе кристаллизации жидкости, которая входит в состав полуфабриката. Результаты экспериментальных исследований теплофизических характеристик приводятся в [6–10].

Подбор компонентов оборудования производится на основе знаний о характеристиках объекта производства, материалов производственной линии и внешних условий. Нередко для подбора привлекают расчетные методы, в том числе методы математического моделирования [11–14]. Такие подходы позволяют спрогнозировать пове-

дение исследуемого объекта без построения сложного, трудоемкого и порой дорогостоящего технологического процесса. В результате определяются распределения механических нагрузок, температурных полей, на основе которых определяются прочностные характеристики и производственные мощности элементов оборудования, параметры цеха (мощности электрических, тепловых и водопроводных сетей и т. д.) Так, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ располагает обширным лабораторным комплексом для проведения расчетно-экспериментальных исследований характеристик широкого спектра материалов в значительном температурном диапазоне [15].

Цель исследования – изучение теплопроводности и теплоемкости органической эмульсии для подбора характеристик компонентов нагревательного и холодильного оборудования производственной линии.

1. Материалы и методы

Объект исследования – органическая эмульсия, представляющая собой мелко измельченное до пастообразного состояния и перемешанное мясо свинины и говядины. С помощью экспериментальных методов изучались теплопроводность и теплоемкость. Объект исследований поставлялся в виде замороженного брикета неопределенной формы массой ~5 кг.

Для измерения теплопроводности был проведен анализ двух методов: импульсного метода и метода стационарного теплового потока. Импульсный метод позволяет исследовать образцы практически любых материалов в широком диапазоне температур (серийное оборудование позволяет измерять при температурах от –150 до 2800 °С) на сравнительно малых образцах (характерный размер образца 10–15 мм), при этом время измерений одного образца во всем температурном диапазоне не превышает восьмичасовой рабочий день². Суть метода состоит в облучении лицевой поверхности образца кратковременным импульсом лазера и регистрации изменения температуры на его тыльной стороне. При проведении измерений делается ряд допущений, а при обработке полученной зависимости ис-

² ГОСТ Р 57943–2017. Пластмассы. Определение теплопроводности и температуропроводности. Ч. 4. Метод лазерной вспышки. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.; ASTM E 1461-01. Standard test method for thermal diffusivity by the flash method. ASTM committee E37, 2001. 13 p.

пользуются несколько математических моделей. Мясная эмульсия представляет собой мелко измельченную кашицеобразную массу, поэтому измерить образец напрямую не представляется возможным. Однако существует ряд оправок, приспособлений и методов для проведения исследований жидких образцов: расплавов, жидкостей, смол. Для обработки результатов в этом случае необходимо привлекать специальное программное обеспечение, в котором по известным характеристикам материала оправки вычисляется неизвестная теплопроводность исследуемого материала. Такой подход успешно применяется при исследовании теплопроводности и теплопроводности образцов в жидкой фазе, например смол и связующих [16; 17]. Тем не менее стоит отметить, что мясная эмульсия не является однородной жидкой фазой, в ней присутствуют достаточно крупные включения, от содержания и распределения которых будет зависеть изучаемая характеристика. Для решения этой проблемы могут быть использованы нестандартные оправки, в которых толщина образца будет увеличена до 5–7 мм, но в этом случае получаемый сигнал при измерении будет сильно зашумлен, что значительно увеличивает разброс значений и погрешность измерений.

Альтернативным методом измерения теплопроводности является метод стационарного теплового потока³. Его суть в создании стационарного одномерного теплового потока в образце, установленном между нагревателем и холодильником. По результатам определения тепловых потоков при заданной разности температуры нагревателя и холодильника, а также толщины образца определяется теплопроводность. Серийное оборудование обеспечивает температурный диапазон измерений от –160 до 600 °С, при этом используются образцы в виде плит толщиной 10–50 мм и характерным размером 150–300 мм. Большой размер образцов усредняет влияние неоднородности включений по объему образца, а объект исследований не требует измерений при температурах, выходящих за рамки возможностей оборудования. К недостаткам метода стоит отнести длительность измерений. Так, в зависимости от ожидаемых характеристик материала время из-

мерения при одной температуре может достигать 6–8 часов. Исходя из вышесказанного для проведения измерений теплопроводности мясной эмульсии был выбран метод стационарного теплового потока.

Перед проведением измерения необходимо провести подготовку образца. В связи с тем, что полуфабрикат в исходном виде представлял собой замороженный брикет неопределенной формы, напрямую провести его исследование не представляется возможным. Для получения образца с требуемыми геометрическими характеристиками полуфабрикат оттаивался в течение 24 часов, после чего его часть была помещена в полиэтиленовый пакет. В результате механического воздействия плит прибора произошло перераспределение мясной эмульсии, при этом образец стал представлять собой диск толщиной ~20 мм и диаметром ~200 мм.

Измерение теплопроводности проводилось стационарным методом на приборе НFM436 фирмы Netzsch. Этот прибор выпускается серийно и позволяет проводить измерения в диапазоне температур от –20 до 70 °С. Прибор включает управляемые с помощью персонального компьютера нагреватель и холодильник, обеспечивающие установление стационарного теплового потока через образец, при этом испытания проводятся в автоматическом режиме. Привод холодильника с встроенным измерителем толщины обеспечивает оптимальное поджатие образца и измерение еще и его толщины. Перед испытаниями необходимо провести процедуру калибровки тепломеров (датчиков теплового потока) нагревателя и холодильника по результатам измерения эталонного образца. Теплопроводность исследуемого образца рассчитывается на основе закона Фурье по зависимости⁴

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x},$$

где q – тепловой поток через образец, Вт/м²; λ – теплопроводность образца, Вт/(м·К); ΔT – разность температур между верхней и нижней поверхностями образца, К; Δx – толщина образца, м.

Измерение теплоемкости материалов в жидком состоянии не всегда является типичной зада-

³ ГОСТ 7076–99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. М.: Издательство стандартов, 2000. 22 с.

⁴ Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

чей и часто требует дополнительного методического анализа и нестандартной подготовки образцов. Для проведения измерений теплоемкости в настоящей работе был выбран метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК)⁵. Данный метод позволяет производить измерения теплоемкости большого спектра принципиально различных материалов в широком диапазоне температур (от –150 до 1600 °С). В сравнении с другими способами определения теплоемкости, представленными серийно выпускаемым оборудованием (методы смешения, лазерной вспышки и адиабатический), преимущество метода дифференциальной сканирующей калориметрии заключается в возможности проведения высокоточных измерений теплоемкости образцов в жидком состоянии с использованием специализированных тиглей, предотвращающих процессы испарения материала во время нагрева. Таким образом, этот способ измерения позволяет избежать сложной и трудоемкой подготовки образцов для исследований и использования дополнительных приспособлений в процессе измерения. Помимо прочего, на исследуемом интервале температур (от –20 до 95 °С) метод ДСК, в сравнении с вышеупомянутыми способами определения теплоемкости, позволяет произвести эксперимент с наименьшей ошибкой измерения. Это реализуется за счет конструкции прибора, а для работы при низких температурах используется дополнительный блок для автоматизированной подачи жидкого азота.

В основе метода ДСК лежит регистрация разности температур между исследуемым образцом и эталоном в процессе нагрева или охлаждения и последующее определение теплового потока – производной теплоты по времени.

$$\Phi(\Delta T) = T(x_2) - T(x_1) = f(x),$$

где Φ – тепловой поток, Вт; ΔT – разность температур исследуемого образца и эталона, К; x_1, x_2 – две точки измерительной системы (контактные площадки для эталона и образца); $f(x)$ – некоторая функциональная зависимость от координат.

Для проведения эксперимента образец и эталон помещаются в тигли, симметрично расположенные в измерительной ячейке, и производится программируемый нагрев с заданной скорос-

тью (рис. 1). При этом в измерительной ячейке обеспечиваются максимально возможные условия для равномерного нагрева обеих тиглей (образца и эталона). Тогда при протекании в исследуемом материале процессов с изменением энтальпии (превращения с выделением или поглощением тепла) будет зарегистрирована разница температур между образцом и эталоном.

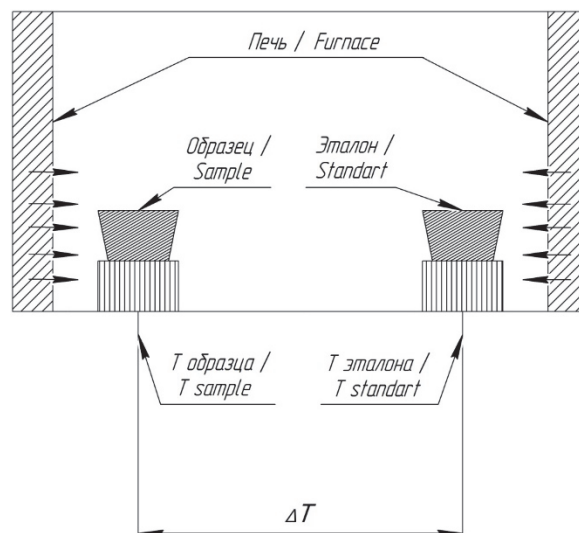


Рис. 1. Схема измерительной ячейки дифференциального сканирующего калориметра
Figure 1. The diagram of the measuring cell of the differential scanning calorimeter

Измерение удельной теплоемкости методом ДСК выполняется с использованием эталонного образца сравнения с известной теплоемкостью и осуществляется в несколько этапов:

- калибровочный нагрев пустых тиглей для регистрации ДСК сигнала базовой линии;
- нагрев образца и пустого тигля для регистрации ДСК сигнала исследуемого материала;
- нагрев эталонного образца сравнения и пустого тигля для регистрации ДСК сигнала эталонного материала.

Дальнейший расчет удельной теплоемкости из экспериментального сигнала ДСК определяется следующим соотношением:

$$C_{\text{обр}} = \frac{\text{ДСК}_{\text{обр}} - \text{ДСК}_{\text{баз}}}{\text{ДСК}_{\text{эт}} - \text{ДСК}_{\text{баз}}} \cdot \frac{m_{\text{эт}}}{m_{\text{обр}}} C_{\text{эт}},$$

где $\text{ДСК}_{\text{обр}}$ – экспериментальный сигнал измерения образца, мВт/мг; $\text{ДСК}_{\text{эт}}$ – экспериментальный сигнал измерения эталонного образца сравнения, мВт/мг; $\text{ДСК}_{\text{баз}}$ – экспериментальный

⁵ ГОСТ Р 56754. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Ч. 4. Определение удельной теплоемкости. М.: Стандартинформ, 2016. 14 с.

сигнал измерения пустых тиглей (базовая линия), мВт/мг; $m_{обр}$ – масса образца, мг; $m_{эт}$ – масса эталонного образца сравнения, мг; $C_{эт}$ – удельная теплоемкость эталонного образца сравнения, Дж/(мг·К).

В данной работе измерения теплоемкости мясной эмульсии проводились на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204 F1 фирмы Netzsch. Нагрев образцов производился со скоростью 5 К/мин в динамической среде аргона в диапазоне температур от -5 до 95 °С. Измерения проводились в алюминиевых тиглях с использованием уплотненного корундового порошка на дне для улучшения контакта и предотвращения загрязнений. При всех измерениях используется одинаковое количество порошка, которое учитывалось коррекцией базовой линии. В качестве калибровочного образца для определения теплоемкости использовался сапфир.

2. Результаты и обсуждение

Теплопроводность мясной эмульсии измерялась стационарным методом в диапазоне температур от -5 до 95 °С. Результаты измерений приведены на рис. 2.

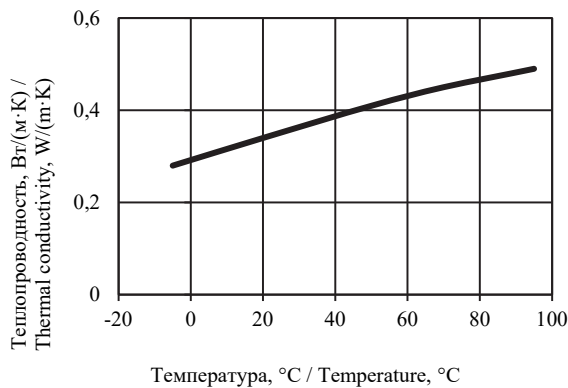


Рис. 2. Зависимости изменения теплопроводности мясной эмульсии от температуры
Figure 2. The temperature dependence of the thermal conductivity of the meat emulsion

Как видно из рис. 2, теплопроводность имеет монотонно возрастающий характер. Значения теплопроводности изменяются от 0,28 до 0,49 Вт/(м·К). Результаты известных литературных данных по теплопроводности различных фаршей представлены на рис. 3. Можно отметить, что измеренные значения теплопроводности схожи с литературными. Некоторые отличия связаны как с

размером фракции мяса при измельчении, так и с видом мяса (теплопроводность фаршей говядины и свинины отличается на $\sim 5\%$).

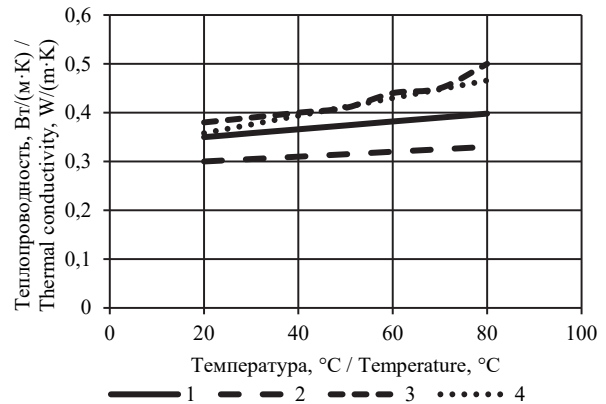


Рис. 3. Теплопроводность различных видов фаршей [5]:
1 – фарш для сосисок № 1; 2 – фарш для сосисок № 2;
3 – фарш говядины; 4 – фарш свинины
Figure 3. Thermal conductivity of various types of minced meat [5]:
1 – minced sausage No. 1; 2 – minced sausage No. 2;
3 – minced beef; 4 – minced pork

На кривых ДСК нагрева образцов мясной эмульсии (рис. 4) наблюдаются пики с эндотермическими тепловыми эффектами в диапазоне температур от -20 до 20 °С. Объяснение данных изменений на кривых ДСК заключается в поглощении тепла образцами материала в процессе перехода из замороженного твердого состояния в жидкое. Соответственно, данный тепловой эффект можно наблюдать и на температурной зависимости теплоемкости (рис. 5).

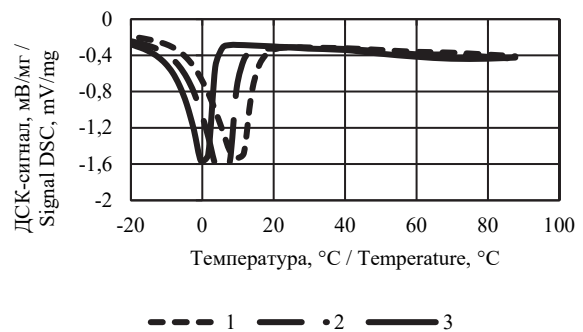


Рис. 4. ДСК-кривая измерения образцов мясной эмульсии:
1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3
Figure 4. DSC curve of measurement of meat emulsion samples:
1 – sample No. 1; 2 – sample No. 2; 3 – sample No. 3

Значения теплоемкости в интервале температур перехода замороженной мясной эмульсии в вязкое состояние (без учета теплового эффек-

та) будут описываться полиномом второй степени. Тогда значения истинной удельной теплоемкости от -20 до 95 °С будут представляться аппроксимированной температурной зависимостью, изображенной на рис. 6.

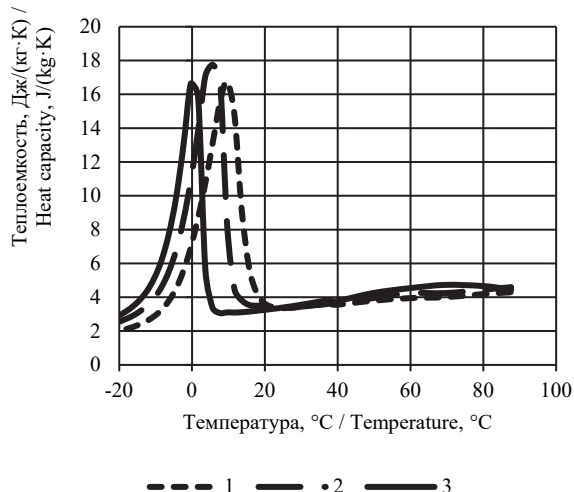


Рис. 5. Температурная зависимость теплоемкости образцов мясной эмульсии: 1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3
Figure 5. Temperature dependence of the heat capacity of meat emulsion samples: 1 – sample No. 1; 2 – sample No. 2; 3 – sample No. 3

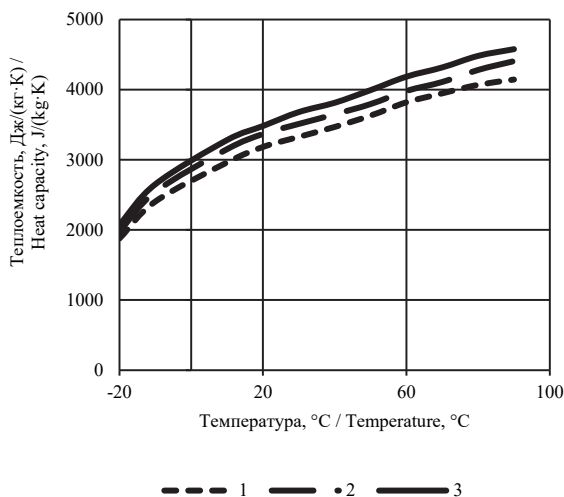


Рис. 6. Аппроксимированная температурная зависимость истинной теплоемкости образцов мясной эмульсии: 1 – образец № 1; 2 – образец № 2; 3 – образец № 3
Figure 6. Approximated temperature dependence of the true heat capacity of meat emulsion samples: 1 – sample No. 1; 2 – sample No. 2; 3 – sample No. 3

На основе полученных результатов эксперимента установлено, что по усредненным данным теплоемкость образцов мясной эмульсии,

в исследуемом интервале температур, составляет от 2800 до 4410 Дж/(кг·К).

Можно показать, что результаты исследования согласуются с литературными результатами, приведенными в [5]. Отличия связаны с массовым присутствием отдельных фракций в фарше, видом мяса, из которого изготавливают фарш, и содержанием в нем влаги.

Закключение

С помощью серийно выпускаемого оборудования проведено исследование теплопроводности и теплоемкости мясной эмульсии в диапазоне температур от -5 до 90 °С. Теплопроводность измерялась на приборе HFM436 методом стационарного теплового потока, теплоемкость – на приборе DSC204F1 методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

Установлено, что значения теплопроводности, измеренные методом стационарного теплового потока, изменяются от 0,28 до 0,49 Вт/(м·К). Теплоемкость образца, измеренная методом дифференциальной сканирующей калориметрии, изменяется от 2800 до 4410 Дж/(кг·К). Полученные значения теплофизических характеристик хорошо согласуются с литературными результатами.

Список литературы

1. Горлов Д.С., Александров Д.А., Заклякова О.В., Азаровский Е.Н. Исследование возможности защиты интерметаллидного титанового сплава от фреттинг-износа путем нанесения ионно-плазменного покрытия // Труды ВИАМ. 2018. № 4 (64). С. 51–58. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-4-51-58>
2. Демин С.А., Виноградов С.С. Ремонт химического оксидного покрытия на углеродистой стали // Труды ВИАМ. 2018. № 9 (69). С. 43–50. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-43-50>
3. Зянкин М.Б. Совершенствование процесса измельчения мяса // Все о мясе. 2011. № 6. С. 14–15.
4. Стефановский В.М. Закономерности морозильного хранения мяса и мясопродуктов // Все о мясе. 2011. № 3. С. 14–15.
5. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.
6. Дульгер Н.В., Зарипов Р.Н., Лысова В.Н. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик продуктов животного происхождения // Вестник АГТУ. 2005. № 2. С. 284–287.

7. Sanz P., Alonso M.D., Mascheroni R. Thermophysical properties of meat products: general bibliography and experimental values // *Transactions of the ASAE*. 1987. Vol. 30. No. 1. Pp. 283–289. <https://doi.org/10.13031/2013.30441>
8. Marcotte M., Taherian A., Karimi Y. Thermophysical properties of processed meat and poultry products // *Journal of Food Engineering*. 2008. Vol. 88. Pp. 315–322. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2008.02.016>
9. Hassan H.F., Ramaswamy H. Measurement and targeting of thermophysical properties of carrot and meat based alginate particles for thermal processing applications // *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 107. No. 1. Pp. 117–126. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2011.05.028>
10. Budžaki S., Šeruga B. Specific heat and thermal conductivity of the Croatian unleavened dough // *International Journal of Food Properties*. 2015. Vol. 18. No. 10. Pp. 2300–2311. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.971180>
11. Зуев А.В., Лоцинин Ю.В., Баринов Д.Я., Мараховский П.С. Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических свойств // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 575–595. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595>
12. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина*. М.: Наука, 2006. С. 56–78.
13. Лысова В.Н., Дульгер Н.В. Методика расчета теплофизических характеристик замороженной рыбы // *Вестник АГТУ*. 2004. № 1. С. 187–193.
14. Schmalko M.E., Morawicki R.O., Ramallo L.A. Simultaneous determination of specific heat capacity and thermal conductivity using the finite-difference method. // *Journal of Food Engineering*. 1997. Vol. 31. Pp. 531–540. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(96\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(96)00074-X)
15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
16. Чэнь Я., Мараховский П.С., Мальшиева Г.В. Определение теплофизических свойств эпоксидных материалов в процессе их отверждения // *Труды ВИАМ*. 2018. № 9 (69). С. 119–123. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-43-50>
17. Лоцинин Ю.В., Фоломейкин Ю.И., Пахомкин С.И. Исследование теплоемкости металлических материалов с покрытием методом лазерной вспышки // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. Т. 81. № 9. С. 40–44.
- coating. *Proceedings of VIAM*. 2018;(4):51–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-4-51-58>
2. Dyomin SA, Vinogradov SS. Repair of chemical oxide coating on carbon steel. *Proceedings of VIAM*. 2018;(9):43–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-43-50>
3. Zyankin MB. Improvement of the meat grinding process. *All about Meat*. 2011;(6):14–15. (In Russ.)
4. Stefanovsky VM. Regularities of freezing storage of meat and meat products. *All about Meat*. 2011;(3):14–15. (In Russ.)
5. Ginzburg AS, Gromov MA, Krasovskaja GI. *Thermophysical characteristics of food products*. Moscow: Pishhevaia Promyshlennost' Publ.; 1980. (In Russ.)
6. Dulger NV, Zaripov RN, Lysova VN. Experimental evaluation of thermophysical characteristics of animal products. *Bulletin of the AGTU*. 2005;(2):284–287. (In Russ.)
7. Sanz P, Alonso MD, Mascheroni R. Thermophysical properties of meat products: general bibliography and experimental values. *Transactions of the ASAE*. 1987; 30(1):283–289. <https://doi.org/10.13031/2013.30441>
8. Marcotte M, Taherian A, Karimi Y. Thermophysical properties of processed meat and poultry products. *Journal of Food Engineering*. 2008;88:315–322. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2008.02.016>
9. Hassan HF, Ramaswamy H. Measurement and targeting of thermophysical properties of carrot and meat based alginate particles for thermal processing applications. *Journal of Food Engineering*. 2011;107(1):117–126. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2011.05.028>
10. Budžaki S, Šeruga B. Specific heat and thermal conductivity of the Croatian unleavened dough. *International Journal of Food Properties*. 2015;18(10): 2300–2311. <https://doi.org/10.1080/10942912.2014.971180>
11. Zuev AV, Loshchinin YuV, Barinov DY, Marakhovskiy PS. Computational and experimental investigations of thermophysical properties. *Aviacionnye Materialy and Tehnologii*. 2017;(S):575–595. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595>
12. Kablov EN, Petrushin NV. Computer-aided design of cast heat-resistant nickel alloys. *Casting Heat-Resistant Alloys. The Effect of S.T. Kishkina*. Moscow: Nauka Publ.; 2006. p. 56–78. (In Russ.)
13. Lysova VN, Dulger NV. Method of calculation of thermophysical characteristics of frozen fish. *Vestnik AGTU*. 2004;(1):187–193. (In Russ.)
14. Schmalko ME, Morawicki RO, Ramallo LA. Simultaneous determination of specific heat capacity and thermal conductivity using the finite-difference method. *Journal of Food Engineering*. 1997;31:531–540. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(96\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(96)00074-X)
15. Kablov EN. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC of RF on realization of “strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030”. *Aviacionnye Materialy and Tehnologii*. 2015;(1):3–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>

References

1. Gorlov DS, Alexandrov DA, Zaklyakova OV, Azarovskiy EN. Investigation of the possibility of protection of intermetallic titanium alloy against fretting wear by ion-plasma

16. Chen Y., Marakhovsky PS, Malysheva GV. Determination of thermophysical properties of epoxy materials during their curing. *Proceedings of VIAM*. 2018;(9):119–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-9-43-50>

17. Loshchinin YuV, Folomeykin YuI, Pakhomkin SI. Study of the heat capacity of coated metal materials using laser flash method. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*. 2015;81(9):40–44. (In Russ.)

Сведения об авторах

Баринов Дмитрий Яковлевич, кандидат технических наук, инженер 2-й категории, лаборатория исследования теплофизических свойств, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17; старший преподаватель, кафедра ракетно-космических композитных конструкций, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; ORCID: 0000-0003-0541-2744, Scopus Author ID: 57195983194, eLIBRARI SPIN-код: 4756-4549; rasma1@mail.ru

Шорстов Сергей Юрьевич, техник 1-й категории, лаборатория исследования теплофизических свойств, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Радио, д. 17; ORCID: 0000-0003-4742-3644, Scopus Author ID: 57215871673, eLIBRARI SPIN-код: 6350-2742; Sshorstov7@gmail.com

About the authors

Dmitry Ya. Barinov, PhD, engineer of the 2nd category, Laboratory “Research of Thermophysical Properties”, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, National Research Center “Kurchatov Institute”, 17 Radio St, Moscow, 105005, Russian Federation; senior lecturer, Department of Rocket and Space Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0541-2744, Scopus Author ID: 57195983194, eLIBRARI SPIN-code: 4756-4549; rasma1@mail.ru

Sergey Yu. Shorstov, technician of the 1st category, Laboratory “Research of Thermophysical Properties”, All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials, National Research Center “Kurchatov Institute”, 17 Radio St, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4742-3644, Scopus Author ID: 57215871673, eLIBRARI SPIN-code: 6350-2742; Sshorstov7@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-302-310
UDC 621.1-1/-9


Research article / Научная статья

Optimization of the structure of turbine blades produced by methods of additive technologies

Vladislav O. Eroshenko^a , Marianna Yu. Malkova^a , Alexander N. Zadiranov^b ,
Alexey V. Meshcheryakov^b , Siamak Ghorbani^a 

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

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

 vladrusty00@yandex.ru

Article history

Received: August 11, 2022

Revised: September 28, 2022

Accepted: September 29, 2022

Keywords:

gas turbine engine blade, design, modeling, 3D printing

Abstract. This study is devoted to the analysis of methods for optimizing the process of manufacturing turbine blades using additive technologies, taking into account the factors of external and internal influence on the finished product, determining the parameters for manufacturing the part, as well as the technical and technological aspects of additive manufacturing of the part. The validity of this integrated approach lies in the complexity of production and the extreme nature of the operation of the part itself, which makes it impossible to accurately estimate the duration of the operation period. But the ability to additively manufacture turbine blades with precise final characteristics will allow the production of a high-quality part with a predictable operational process. In view of these requirements, the authors give recommendations on the criterial and algorithmic support of the process of optimizing the manufacture of a gas turbine engine blade. As a result of the research, it was concluded that the main criterion for optimizing the shape of a gas turbine engine blade is to maintain a constant distance between the corresponding boundary points of the blade sections. Therefore, it will be more efficient and expedient to optimize not the shape of the blade, but the composite from which it is made.

For citation


Eroshenko VO, Malkova MYu, Zadiranov AN, Meshcheryakov AV, Ghorbani S. Optimization of the structure of turbine blades produced by methods of additive technologies. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):302–310. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-302-310>

Оптимизация конструкции лопаток турбин при производстве методами аддитивных технологий

В.О. Ерошенко^a , М.Ю. Малькова^a , А.Н. Задиранов^b , А.В. Мешчеряков^b , С. Горбани^a 

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bАкадемия государственной противопожарной службы МЧС, Москва, Российская Федерация

 vladrusty00@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 11 августа 2022 г.

Доработана: 28 октября 2022 г.

Принята к публикации: 29 октября 2022 г.

Аннотация. Анализируются способы оптимизации процесса производства лопаток турбин методами аддитивных технологий с учетом факторов внешнего и внутреннего воздействия на готовое изделие, определяются параметры изготовления детали, а также технико-технологич-



Ключевые слова:

лопатка газотурбинного двигателя, конструкция, оптимизация, моделирование, 3D-печать

ческие аспекты ее аддитивного изготовления. Обоснованность данного комплексного подхода заключается в сложности производства и экстремальности эксплуатации самой детали, что приводит к невозможности точно оценить продолжительность периода эксплуатации готового изделия. Цель работы – определение оптимальных характеристик процесса аддитивного производства лопатки газотурбинного двигателя. Возможность аддитивного производства лопаток турбин с точными конечными характеристиками позволит производить деталь высокого качества с прогнозируемым эксплуатационным процессом. Разработаны рекомендации по критериальному и алгоритмическому сопровождению процесса оптимизации изготовления лопатки газотурбинного двигателя. По результатам проведенных исследований сделан вывод о том, что в качестве основного критерия оптимизации формы лопатки газотурбинного двигателя необходимо принять сохранение постоянного расстояния между соответствующими граничными точками сечений лопаток. Следовательно, эффективнее и целесообразнее оптимизировать не форму лопатки, а композит, из которой она изготовлена.

Для цитирования

Eroshenko V.O., Malkova M.Yu., Zadiranov A.N., Meshcheryakov A.V., Ghorbani S. Optimization of the structure of turbine blades produced by methods of additive technologies // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 302–310. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-302-310>

Introduction

Additive technologies are gaining more and more popularity in the production of parts that are subject to high quality control and durability requirements. The whole process of additive manufacturing should be monitored at each stage of material-production-post-processing-product to determine the most optimal parameters.

Turbine blades have a complex geometric shape, at the same time, high requirements are imposed on the quality of their manufacture, since a violation of the geometric shape can lead to a decrease in the efficiency of the turbine. Quality control of blades is a multi-stage process, which in the vast majority of cases is carried out manually, whereas at present methods of optimizing production processes and quality control of machine-building parts by mathematical modeling are becoming more and more relevant [1–4].

1. Statement of the research task

The purpose of the work is to determine the optimal characteristics of the additive manufacturing process of a gas turbine engine (GTE).

At the first stage of developing the technology of additive manufacturing of blades, it is necessary to develop criteria that must be met during the production of the part to achieve the maximum degree of quality. First, it is necessary to identify several control parameters of reliability. Since reliability is a time-

varying parameter, the group of control parameters should be exclusively dynamic in nature and have the ability to transform, which can be tracked and recorded, while highlighting the influence of a specific factor on the product under study [5].

The first and most obvious control parameter is temperature. It should be noted that temperature parameters, in particular fluctuation fields, are quite difficult to measure and track at high temperatures. Therefore, one of the objectives of the study is to assess changes in the nature of the propagation of the temperature field during the life cycle of the part.

The next equally important parameter is the response to vibration – the vibration spectrum. Measuring this parameter is also a technically difficult operation, since this spectrum must be taken on a moving apparatus, the mounting of sensors of which does not meet the necessary reliability. Technically, the system includes a sensor equipped with a microwave element. The response to the vibration effect is formed inside the sensor itself, namely, by converting mechanical vibrations into high-frequency radio signals. This process consists of the following steps [6]:

- excitation of the sensor receiver when the blade moves;
- detection of mechanical vibration waves;
- translation of mechanical vibration into radio frequency vibrations.

As in the case of assessing the detail by temperature fluctuations, in this situation it is also necessary to identify diagnostic signs. In this case, it is recommended to consider by analogy not one parameter, but a pair: a spectrum describing the state of the blade under the influence of vibration and anomalies in the structure of this spectrum, which will indicate critical states of the blade that can lead to breakage. Any software product can be used for visualization and calculation, which will make the following assumptions [7]:

- replacement of metal elements with equivalent electric currents;
- excitation of the medium in the chamber volume by these currents;
- imposition of boundary conditions;
- splitting of conducting surfaces into elementary platforms, the length of which does not exceed $L = \lambda/8$, where λ is the wavelength of the electromagnetic field;
- compilation of systems of linear algebraic equations for these currents;
- solution of the obtained equations.

Such a significant number of assumptions, at first glance, complicates the calculation and modeling, but these assumptions allow us to move away from the practical development of the system, having a minimal set of initial data; simulate the remaining parameters, or immediately obtain oscillatory characteristics by setting only qualitative parameters of the blade. The proposed method makes it possible to simulate the oscillation spectrum fairly accurately and without the use of additional means [8].

In contrast to the simulation of vibration spectra, diagnostics using anomalies in the structure of the spectrum is a more analytical issue, requiring an understanding of the life cycle of the blade [9]. For the analytical evaluation of the data obtained, it is necessary to identify criteria in accordance with which anomalies should be compared and calculated. Due to the fact that we remove 2 wave characteristics – working (vibration) and radio frequency (converted by the sensor), then the criteria will be set for these measured values. It is also necessary to take into account that the operating characteristic has such a property as the cyclicity of responses, which must be taken into account when calculating and modeling more than one cycle. Then, according to [6], the frequency of the workflow is

$$F_H = \frac{F_r n}{60} = F_B n, \tag{1}$$

where F_r – the number of revolutions (rpm) of the rotor; F_B – the rotation frequency of the rotor, Hz; n – the number of turbine rotor blades.

Let us consider the use of the spectrum of radio response sequences. The workflow with this spectrum modulates the radio frequency oscillation in the autodyne sensor (Figure 1). When studying the figure, it becomes obvious that the processes of vibration of the gas turbine engine during movement and the flow of the medium passing through the gas turbine engine contribute to each peak section. The graph shows that two characteristics of the read signals are displayed at once: the amplitude for the vibration effect and the frequency for the translated radio signal.

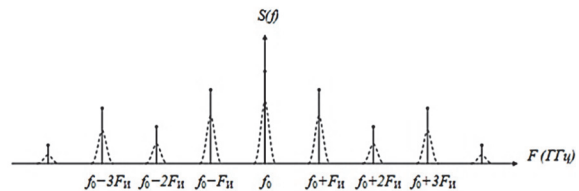


Figure 1. Radio frequency response spectrum, hHz

Since the spectral components in this case are of interest not only as an amplitude characteristic, but also as a true value modulo, it is necessary to develop a mathematically sound calculation method, according to which the main control parameters of reliability for any given blade will be calculated further. All calculations and algorithms will be further carried out within the $(-\theta_1, 0)$ half-wave segment of the cosine, where $[\cos \theta - \cos(\omega t)] = \cos \tau$, $\omega = 2\pi(F_H, t)$, τ are dimensionless [9].

The approximation of the symmetric branch of the cosine should be carried out taking into account the slow: $\rho\tau (\rho < 1)$ and fast oscillation phases: $q\tau (q < 1)$ having an amplitude of $\mu \ll 1$.

Based on the above, we will make a system of equations:

$$\alpha(\tau) = \begin{cases} 0,5A(\cos \tau - \cos \theta_1), \tau \in (-\theta_1, 0); \\ 0,5A(\cos \theta_1 - \cos(\rho\tau)) + \mu \cos(q\tau), \tau \in (0, \theta_2). \end{cases} \tag{2}$$

Since there is a radio frequency characteristic in the spectral characteristic under consideration, the use of Fourier coefficients will be legitimate:

$$\gamma_n(\theta_{1,2}, p, q, \mu) = \frac{1}{\pi A} \int_{-\theta_1}^0 a(\tau) \cos(n\tau) d\tau. \tag{3}$$

A significant advantage of the chosen approximation method is the simplicity and possibility of obtaining equations without composing systems and matrices, which not only simplifies calculations, but also reduces the probability of error. The main components of the study and approximation are the constant component (4) and the amplitude of the first harmonic (5):

$$\begin{aligned} \gamma_0(\theta_{1,2}, p, q, \mu) &= \\ &= \frac{1}{\pi} (\sin \theta_1 - \theta_1 \cos \theta_1) + \\ &+ \frac{1}{\pi p} (\sin \theta_2 - \theta_2 \cos \theta_2) + \\ &= \frac{\mu}{2\pi q} (\sin \theta_2 - \theta_2 \cos \theta_2). \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \gamma_1(\theta_{1,2}, p, q, \mu) &= \\ &= \frac{1}{\pi} \sin(2\theta_1) + \frac{1}{\pi p} (\sin(2\theta_2)) + \\ &+ \frac{\mu}{2\pi q} \left[\frac{\sin(\theta_2(q+1))}{q+1} - \frac{\sin(\theta_2(q-1))}{q-1} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

In the process of this study, the determination of the parameters of the working spectrum will allow not only to evaluate the characteristic parameters of the geometric and physico-chemical properties of the working blade, but also by the presence of a discrete component of the spectrum to determine additional effects from the entire unit of equipment on a single blade (Figure 2). This factor is often not taken into account in the workflow, while providing a huge impact on the durability of the blades [10].

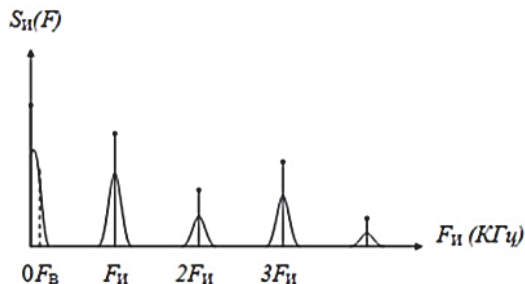


Figure 2. The working spectrum of the GTE blades, kHz

The main diagnostic parameter is the vibration spectrum. Let us consider in more detail its graphi-

cal arrangement (Figure 3), in which the initial indications of the movements of control points on the surface of the blade are translated into a spectrum by differentiation. Usually, this spectrum has a non-smooth envelope even in a safe situation, and nevertheless, it is it that is taken as a standard when compared with any real spectrum when evaluating performance characteristics.

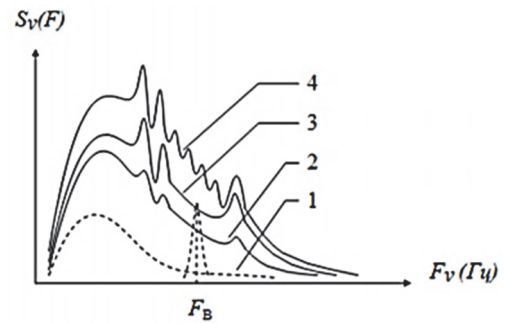


Figure 3. Vibration response spectra, Hz: 1 – reference; 2 – abnormal; 3 – critical; 4 – emergency

Table 1 shows the parameters used to control the reliability of blades, modeling, and calculations in the manufacture of blades, including using additive technologies.

Diagnostic responses and their causes

No.	Cause	Response
1	Shaft speed	Change the workflow interval
2	Shaft beat	Component F_B on several of the impellers
3	Deformation of the blades	Change in the value of γ_n
4	Vibration of the blades	Blurring of spectral lines
5	Blade breakage	Failure of the blades of the F_B component, but of smaller amplitude and observed on one of the impellers

The table shows the most significant criteria that can be used for work on the development of additive manufacturing technology parts. In practice, the assessment of the node's condition is based on a comparison of the readings of several sensors in the corresponding measuring channels. However, excessive complication by introducing additional parameters can lead to an increase in operating time, as well as to errors [7].

2. Choosing an optimization method

When choosing an optimization method, first of all, it is necessary to be guided by two important factors. Firstly, work is carried out on a product of a rather complex geometric shape, characterized by a significant set of requirements for physical and mechanical properties. Secondly, the optimization of the part must be carried out in the context of its manufacture using additive technology. Thus, re-

strictions will be set not only taking into account the operational properties of the part, but also the method of its manufacture [11].

Since the task is multifaceted, it is possible to use the Pareto principle or transform a multi-criteria design problem into a single-criteria problem. At the first stage, a vector model is created that will allow you to evaluate the shape of the part and make possible adjustments [12] (Figure 4).

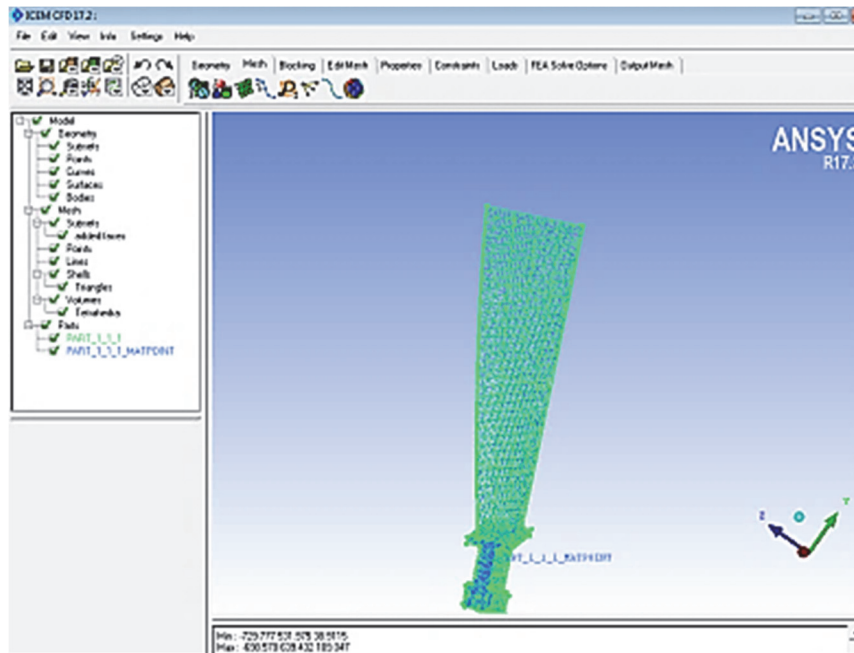


Figure 4. Creation of a vector model of a GTE blade

After building the model, focusing on the final goal, it is necessary to determine the optimization method, which depends on the method of setting parameters, the dimension of the parametric space, the smoothness of the goal functions and constraints, a constant and variable set of restrictions on iterations, etc. These operations are performed using various software modules, since it is quite difficult to manually account for all parameters, and, in addition, the software package allows you to save all iterations and results [13].

The choice of the software product is also determined by whether the optimization is local or global, the choice of the method and the limits of approximation of constructions and transformations will depend on this. Of course, software products that work with local parameters solve problems more quickly, but they are less loaded with source data [14].

Local approximation methods use current information about the point and, possibly, the results

of previous iterations. Based on this information, the transition to the next point is carried out. If the problem has several local optima, then each of them will have its own area of attraction, which may be characterized by a complex structure. In this case, global approximation methods have some advantage, especially if the found approximation corresponds to the true functions of the goal and constraints. Despite the fact that the construction of a global approximation requires significantly more calculations of goal functions and constraints, finding several solutions or a Pareto set for a multi-criteria task will be carried out without additional calls to an external calculation program (Figure 5).

Methodically, the optimization of the blade design cannot be reduced to improving a specific parameter without studying the impact This parameter is used in a real system both in a static and dynamic state [15].

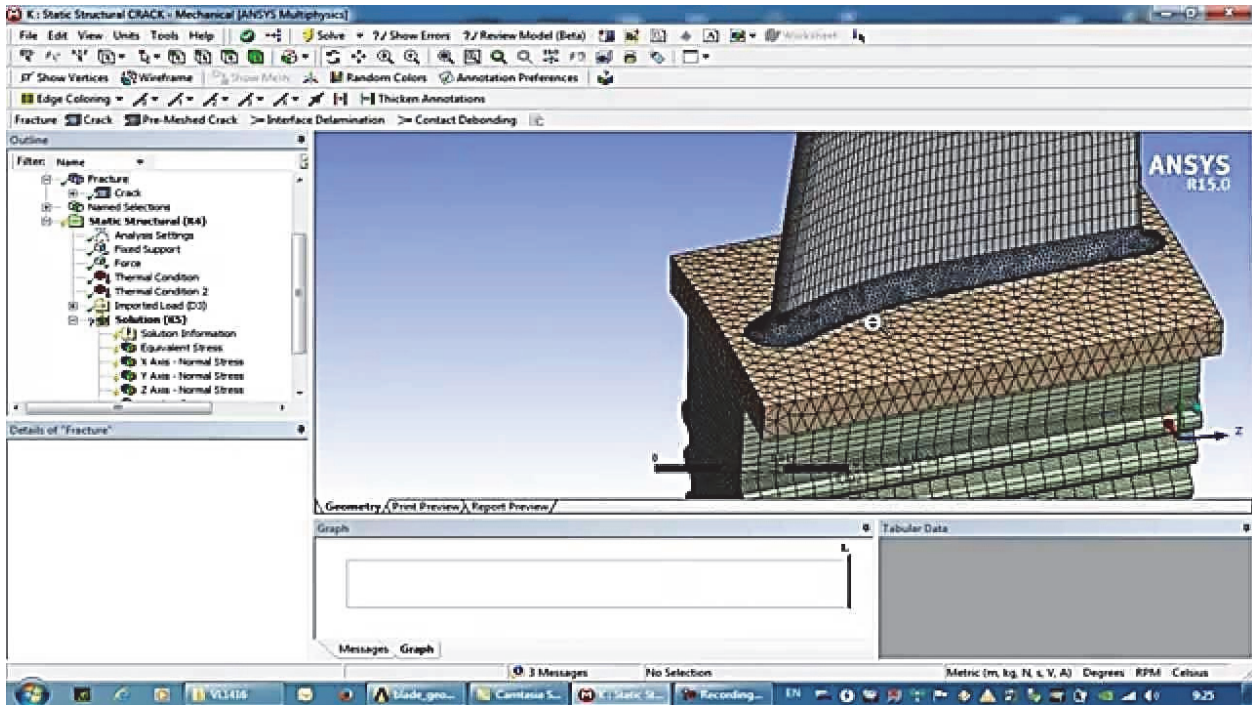


Figure 5. Selection of areas for local approximations

3. Discussion

In general, it is possible to describe and justify an algorithmic approach for the software optimization of a structural element – the blades of a gas turbine engine [16]. Like any modeling software package, this product must have a block or modular structure to divide the task into post-evaluated processes, the results of which in the final module are reduced to obtaining the desired characteristic. A special control program can be used to control the interaction between modules (Figure 6). For simplification, such software packages often use dialog boxes together with a graphical interface that reflects not only the final, but also intermediate results.

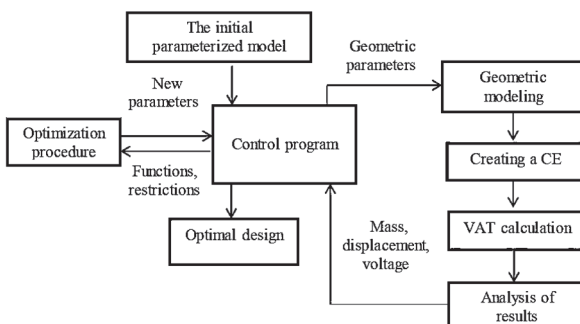


Figure 6. Structure of interaction between modules in the optimization problem

The calculation process itself can take place using the finite element method or the boundary element method [17].

When executing this command file, the following is produced [18]:

- building a geometric model;
- building a finite element grid;
- application loads;
- calculation of stress-strain states;
- output of results.

The algorithm of the program is always the same, so even a single change in parameters triggers the same data processing mechanism.

The study of practical data and equipment catalogs allowed us to conclude that the main approaches to optimizing the blades of the gas turbine engine are reduced to solving the problems of reducing the mass of the entire structure (Figure 7) and obtaining a stress-strain state in the blade and disk that meets the requirements and limitations on manufacturability and strength, which refers to the task of designing the shape of the part [19].

When developing a method for optimizing the blade design, it is necessary to solve not only the problem of geometric characteristics, but also to preserve or increase the reliability and wear resistance of the blade [20]. One of the key points of modeling is the evaluation of the aerodynamics of

the part being developed. To conduct research, a part in a computer model is placed in a stream and the

emerging pattern of vortex flows and flow around the blade is evaluated (Figure 8).

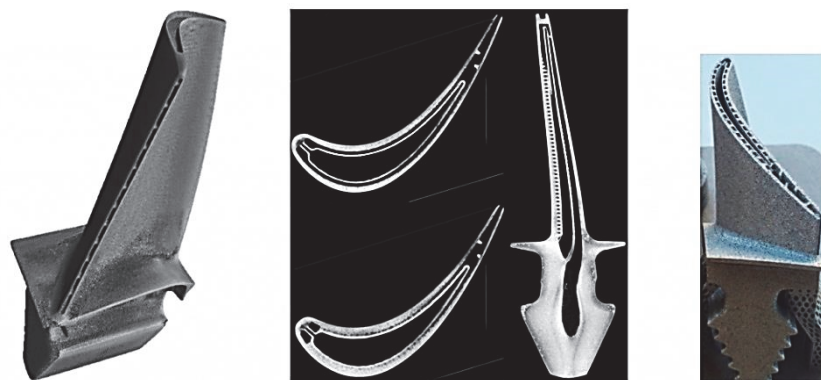


Figure 7. Reduction the mass of the structure due to the creation of hollow blades

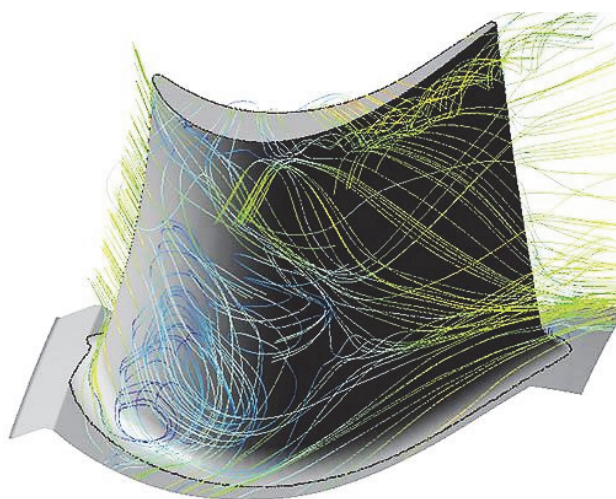


Figure 8. Aerodynamic evaluation of the model

The ultimate goal is to obtain a blade shape that will not overload the system with its mass but will remain strong enough and resistant to vibration loads, temperature fluctuations and will maintain the trajectory of movement in the flow. To fulfill these requirements, it is necessary to take as an optimization criterion the preservation of the constant distance between the corresponding boundary points of the blade sections, especially regarding to the sections on the input and output edges of the blade [21]. It means, it is necessary to optimize the shape of the blade itself so that it remains for a long period of operation [22]. Therefore, it will be more efficient and expedient to optimize not the shape of the blade, but the composite from which it will be made. Additive technologies provide such an opportunity. Taking into account the ability of additive technologies to work with almost any metals

and alloys, the proposed optimization direction is extremely relevant [23].

Conclusion

Analysis of the effect of control parameters on the reliability characteristics of the blade of a gas turbine engine showed that as an optimization criterion, it is necessary to take a constant distance between the corresponding boundary points of the blade sections to preserve the shape of the blade over a long period of operation. In the process of the work, a conclusion was made about the effectiveness and expediency of optimizing not the shape of the blade, but the composition of the composite from which it will be made. A method for optimizing the shape of a GTD blade manufactured using additive technology is proposed.

References / Список литературы

1. Wang Yu, Denisov OV, Denisova LV. Modeling of the thermal control system of a nanosatellite using loop heat pipes in orbital flight. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2021;22(1):23–35. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-23-35>
- Ван Ю., Денисов О.В., Денисова Л.В. Моделирование системы терморегулирования наноспутника с помощью контурных тепловых труб в условиях орбитального полета // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 1. С. 23–35. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-1-23-35>
2. Antipov YA, Shatalova II, Shkarin KV, Lapin MV, Sokolov DA, Grinin AO, Toptygin KP. Features of modeling a highly efficient multi-stage steam compression heat pump unit. *RUDN Journal of Engineering Research*.

2021;22(4):339–347. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-339-347>

Антипов Ю.А., Шталова И.И., Шкарин К.В., Лалин М.В., Соколов Д.А., Гринин А.О., Топтыгин К.П. Особенности моделирования высокоэффективной многоступенчатой парокompрессионной теплонасосной установки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 339–347. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-339-347>

3. Mamaev VK, Vinogradov LV, Oshchepkov PP. Modeling of the lattice of profiles of a transport gas turbine engine. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2019;20(2):140–146. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146>

Мамаев В.К., Виноградов Л.В., Ощепков П.П. Моделирование решетки профилей транспортного газотурбинного двигателя // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 140–146. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146>

4. Kornilova AV, Zayar Ch. Determination of permissible parameters of defects in basic parts of forging and pressing machines. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2019;20(4):308–315. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-4-308-315>

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

5. Galiev VE, Fatkullina DZ, Tamindarov DR. On the problems and prospects for the manufacture of compressor blades. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University*. 2014;(FS77):10–25. (In Russ.)

Галиев В.Э., Фаткуллина Д.З., Таминдаров Д.Р. О проблемах и перспективах изготовления компрессорных лопаток // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2014. № ФС77. С. 10–25.

6. Tarasenko IuP, Levanov IuK, Tsareva IN, Shchegolev I L, Chernikov A I. Assessment of the operational condition of the HDPE blades of the GTK-25I unit and technology for extending their life. *Gas Turbine Technologies*. 2004;(7):26–29. (In Russ.)

Тарасенко Ю.П., Леванов Ю.К., Царева И.Н., Щеголев И.Л., Черников А.И. Оценка эксплуатационного состояния лопаток ТНД агрегата GTK-25И и технология продления их ресурса // Газотурбинные технологии. 2004. № 7. С. 26–29.

7. Golubentsev AV. *Increasing the fatigue characteristics of the working blades of the GTU on the basis of improving the technology of casting and heat treatment* (dissertation of the Candidate of Technical Sciences). Rybinsk; 2016. (In Russ.)

Голубенцев А.В. Повышение усталостных характеристик рабочих лопаток ГТУ на основе совершен-

ствования технологии литья и термической обработки: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2016. 78 с.

8. Andrienko AG, Olshanetsky VE, Sklyarevskaya VN, Shmyrko VI. Estimation of damageability and prediction of durability of gas turbine rotor blades. *Technological Systems*. 2001;(3):71–74. (In Russ.)

Андрюенко А.Г., Ольшанецкий В.Е., Скляревская В.Н., Шмырко В.И. Оценка повреждаемости и прогноз долговечности рабочих лопаток ГТУ // Технологические системы. 2001. № 3. С. 71–74.

9. Smyslov AM, Bybin AA, Dementiev AV, Nevyantseva RR, Novikov AV. Evaluation of the maintainability of the blades of gas-pumping units. *Thermal Power Engineering*. 2011;(2):30–35. (In Russ.)

Смыслов А.М., Быбин А.А., Деметьев А.В., Невьянцева Р.Р., Новиков А.В. Оценка ремонтпригодности лопаток газоперекачивающих агрегатов // Теплоэнергетика. 2011. № 2. С. 30–35.

10. Orlov MR. *Technological support of the resource of the working blades of the first turbine stages of aviation and ground-based gas turbine installations* (abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences). Moscow; 2008. (In Russ.)

Орлов М.Р. Технологическое обеспечение ресурса рабочих лопаток первых ступеней турбины авиационных и наземных газотурбинных установок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2008. 24 с.

11. Bhandari S, Lopez-Anido R. Finite element modeling of 3D-printed part with cellular internal structure using homogenized properties. *Progress in Additive Manufacturing*. 2019;4:143–154. <https://doi.org/10.1007/s40964-018-0070-2>

12. Farbman D, McCoy C, Materials testing of 3D printed ABS and PLA samples to guide mechanical design. *ASME 2016 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference*. London: Eurospan; 2016. <https://doi.org/10.1115/MSEC2016-8668>

13. Ferro CG, Mazza A, Belmonte D, Secli C, Maggioro P. A comparison between 3D printing and milling process for a spar cap fitting (wing-fuselage) of UAV aircraft. *Procedia CIRP*. 2017;62:487–493.

14. Kazemian A, Yuan X, Cochran E, Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*. 2017;145:639–647.

15. Liljenherte J, Upadhyaya P, Kumar S. Hyperelastic strain measurements and constitutive parameters identification of 3D printed soft polymers by image processing. *Additive Manufacturing*. 2016;11:40–48.

16. Mahshid R, Hansen HN, Højbjerg KL. Strength analysis and modeling of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting for tooling applications. *Materials and Design*. 2016;104:276–283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.020>

17. Raj SA, Muthukumaran E, Jayakrishna K. A case study of 3D printed PLA and its mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5:11219–11226.

18. Yuen PK. Embedding objects during 3D printing to add new functionalities. *Biomicrofluidics*. 2016;10(4):1–10.
19. Song Y, Li Y, Song W, Yee K, Lee KY, Tagarielli VL. Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA. *Materials and Design*. 2017;123:154–164. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.051>
20. Yao T, Ye J, Deng Z, Zhang K, Ma Y, Ouyang H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: experimental and theoretical analyses. *Composites Part B Engineering*. 2020;188:107894. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107894>
21. Wang L, Zhang M, Bhandari B, Yang C. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing. *Journal of Food Engineering*. 2018;220:101–108.
22. Lee W, Jeon S, Kim D. 3D-printed micromixer with helical blades for highviscosity fluids. Department of Chemical Engineering. 2015. Available from: http://www.rsc.org/images/LOC/2015/PDFs/Papers/1253_T.320e (accessed: 12.08.2022).
23. Pastor-Artigues M-M, Roure-Fernández F, Ayneto-Gubert X, Bonada-Bo J, Pérez-Guindal E, Buj-Corral I. Elastic asymmetry of PLA material in FDM-printed parts: considerations concerning experimental characterisation for use in numerical simulations. *Materials*. 2020;13(1):15.

About the authors

Vladislav O. Eroshenko, postgraduate, Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID:0000-0002-3334-7241, eLIBRARY SPIN-code: 2029-5428; vladrusty00@yandex.ru

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

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

Alexey V. Meshcheryakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Borisa Galushkina St, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6620-8590, eLIBRARY SPIN-code: 1044-5995; malviktp@gmail.com

Siamak Ghorbani, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0251-3144, Scopus Author ID: 56532034500, eLIBRARY SPIN-code: 8272-2337; gorbani-s@rudn.ru

Сведения об авторах

Ерошенко Владислав Олегович, аспирант, кафедра машиностроительных технологий, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-3334-7241, eLIBRARY SPIN-код: 2029-5428; drusty00@yandex.ru

Малькова Марианна Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры машиностроительных технологий, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-6939-1658, Scopus Author ID: 57214744555, eLIBRARY SPIN-код: 2680-1505; malkova-myu@rudn.ru

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

Мещереков Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент, кафедра процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы МЧС, Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; ORCID: 0000-0001-6620-8590, eLIBRARY SPIN-код: 1044-5995; malviktp@gmail.com

Горбани Сиамак, кандидат технических наук, доцент базовой кафедры машиностроительных технологий, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-0251-3144, Scopus Author ID: 56532034500, eLIBRARY SPIN-код: 8272-2337; gorbani-s@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-311-321
УДК 621.829(07)

Научная статья / Research article

Физико-химические свойства инновационных и высококачественных марок бензина

А.А. Ходяков^a, С.В. Хлопков^a, А.Р. Асоян^{a,b},
Д.В. Истомин^a, Д.Р. Алибекова^a, А.А. Нарожный^a

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bМосковский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация

✉ khlopkov-sv@rudn.ru

История статьи

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

Ключевые слова:

инновационный бензин, высококачественный бензин, фракционный состав, кислотность, плотность, октановое число, срок хранения, регрессия, отработавшие газы







Аннотация. Изучены физико-химических свойства традиционного (Б), инновационного (БИН) и высококачественного бензина (БКВ). Цель работы – проанализировать физико-химические свойства инновационных, высококачественных сортов бензина, сопоставить показатели указанных топлив с показателями обычного горючего, не содержащего веществ, улучшающих эксплуатационные и экологические качества. Исследование свойств бензинов проведено с помощью автоматического аппарата для разгонки нефтепродуктов АРНС-1Э, индикатора (октанометра) ОКТАН-ИМ, газоанализатора ИНФРАКАР 5М3Т, одноцилиндрового, четырехтактного, верхнеклапанного двигателя (Biggs & Stratton). Установлено, что плотность бензинов, температура конца кипения, остаток в колбе и кислотность соответствуют нормам ГОСТ. Полугодичный срок хранения образцов топлива никак не сказывается на параметрах горючего, его физической и химической стабильности. Показано, что вещества, улучшающие свойства инновационных и высококачественных сортов топлива, не оказывают влияния на результат измерения октанового числа бензина. Выявлено, что химическая стабильность улучшенных сортов бензина выше, чем у традиционного топлива. Показано, что по полноте сгорания инновационный и высококачественный бензин превосходит бензины, не содержащий веществ, улучшающих горение. Подобный вывод сделан и для оксидов азота, содержание которых связано с присутствием в бензине компонентов, повышающих температуру газов, возникающих в камере сгорания силового агрегата.

Для цитирования

Ходяков А.А., Хлопков С.В., Асоян А.Р., Истомин Д.В., Алибекова Д.Р., Нарожный А.А. Физико-химические свойства инновационных и высококачественных марок бензина // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 311–321. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-311-321>



Physical and chemical properties of innovative and high-quality grades of gasoline

Aleksandr A. Khodyakov^a , Sergey V. Khlopkov^a ✉, Arthur R. Asoyan^{a,b} ,
Danil V. Istomin^a , Djeqran R. Alibekova^a , Alexey A. Narozhnyi^a 

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

^bMoscow Automobile and Road State Technical University, Moscow, Russian Federation

✉ khlopkov-sv@rudn.ru

Article history

Received: September 15, 2022

Revised: November 25, 2022

Accepted: November 28, 2022

Keywords:

innovative gasoline, high-quality gasoline, fractional composition, acidity, density, octane number, shelf life, regression, exhaust gases

Abstract. Studies of the physicochemical properties of traditional gasoline (G), innovative gasoline (IG) and high-quality gasoline (HQG) have been carried out. The purpose of this work was to analyze the physicochemical properties of innovative, high-quality grades of gasoline, to compare the performance of these fuels with those of conventional fuel that does not contain substances that improve the operational and environmental qualities. The research of the properties of gasolines was carried out using an automatic apparatus for distillation of petroleum products ARNS-1E, indicator (octanometer) OKTAN-IM, gas analyzer INFRACAR 5M3T, single-cylinder, 4-stroke, overhead valve engine (Biggs & Stratton). It has been established that the density of gasolines, the final boiling point, the residue in the flask and the acidity correspond to the GOST standards. A six-month storage period for fuel samples does not affect the parameters of the fuel, its physical and chemical stability. It is shown that substances that improve the properties of innovative and high-quality fuels do not affect the result of measuring the octane number of gasoline. It has been established that the chemical stability of improved grades of gasoline is higher than that of traditional fuel. It is shown that innovative and high-quality gasoline is superior to gasolines that do not contain combustion-improving substances in terms of combustion efficiency. A similar conclusion was made for nitrogen oxides, the content of which is associated with the presence in gasoline of components that increase the temperature of gases that occur in the combustion chamber of the power unit.

For citation

Khodyakov AA, Khlopkov SV, Asoyan AR, Istomin DV, Alibekova DR, Narozhnyi AA. Physical and chemical properties of innovative and high-quality grades of gasoline. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):311–321. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-311-321>

Введение

Известно, что качество бензина характеризуется как эксплуатационными показателями, так и экологическими свойствами топлива. При этом введение современных норм и стандартов, которые связаны не только с модифицированием компонентного состава топлива, но и с необходимостью применения разнообразных присадок ставит задачу контроля физико-химических свойств бензинов¹ [1–5].

Присадки, вводимые, как правило, в бензины, получившие названия (у российских производителей) инновационных и высококачественных моторных топлив, улучшают эксплуатационные и экологические свойства горючего² [6; 7]. При этом всегда возникают (требующие своевременного решения) вопросы, связанные с получением

для студентов учреждений среднего профессионального образования. 9-е изд., стер. М.: Академия, 2014. 208 с.

² Роснефть. Инновационный бензин «Евро 6» отмечен наградами всероссийского конкурса. Управление информационной политики ПАО «НК «Роснефть». 2019. URL: <https://www.rosneft.ru/press/news/item/198117/> (дата обращения: 01.09.2022); ЛУКОЙЛ. Инновационное топливо ЭКТО. URL: <https://lukoil.ru/Products/brands/ectofuel> (дата обращения: 01.09.2022).

¹ ГОСТ 32513–2013. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. 15 с.; Магарил Е.Р., Магарил Р.З. Моторные топлива: учебное пособие. 2-е изд. М.: КДУ, 2015. 160 с.; Кириченко Н.Б. Автомобильные эксплуатационные материалы: учебник

знаний о влиянии улучшающих свойства топлива веществ на показатели бензинов.

Цель исследования – проанализировать физико-химические свойства инновационных, высококачественных сортов бензина, сопоставить показатели указанных сортов с показателями обычного горючего без веществ, улучшающих эксплуатационные и экологические качества топлива.

1. Материалы и методы

Объектами исследования были пробы бензинов (Б-1, БИН-2, БВК-3, Б-4) марки АИ-95 со сроком хранения ~6 месяцев. Из четырех проб, подвергнутых испытанию, один образец относится к так называемым инновационным топливам (БИН-2), другой – к высококачественному топливу стандарта ЕВРО-4 (БВК-3). Анализировали также показатели проб инновационного топлива БИН-95, топлив Б-92 и Б-100 с более длительным сроком хранения.

Объемы жидкостей в зависимости от выполняемых методов испытания варьировали от 1 до 100 мл. Массу объектов исследования измеряли на порционных весах ВЛТЭ-150 (II класс точности, ГОСТ 24104–2001). Наименьший предел взвешивания ВЛТЭ-150 составляет 0,02 г. Предел погрешности весов при интервале взвешивания от 0,02 до 50 г равен ±3 мг, среднеквадратическое отклонение показаний весов не более 1,5 мг.

Фракционный состав проб бензинов определяли по температурам перегонки, измеренным ртутным термометром, входящим в комплект автоматического аппарата для разгонки нефтепродуктов АРНС-1Э, кислотность – титрованием спиртовым раствором КОН смесей бензина 80%-м этанолом. Для индицирования избытка OH^- использовали кислотно-основной индикатор фенолфталеин ($\text{pH} = 8,0\text{--}9,6$). Присутствие в пробах топлива ненасыщенных углеводородов (олефины) оценивали, используя водный раствор KMnO_4 . Известно, что в результате взаимодействия реагента с ненасыщенными углеводородами образуется оксид марганца. Лиловая окраска водного раствора перманганата калия приобретает бурый цвет.

Плотность образцов топлива измеряли нефтенсиметрами (ареометрами), октановые числа – индикатором (октанометром) ОКТАН-ИМ. Диапазон измерения октановых чисел (октановое

число по исследовательскому методу – ОЧИ, октановое число по моторному методу – ОЧМ) от 67 до 98. Предел допускаемой абсолютной погрешности измерения ОЧ составлял ±2 октановые единицы (о. е.). Измерения ОЧИ проводили, используя заводскую калибровку октанометра.

Полноту сгорания взятых на испытание проб бензинов оценивали по содержанию в отработавших газах (ОГ) несгоревших углеводородов CH . Влияние особенностей компонентного состава топлива на указанный процесс проводили, измеряя и анализируя содержание в ОГ оксидов азота NO_x . Контроль содержания в отработавших газах CH и NO_x проводили газоанализатором ИНФРАКАР 5МЗТ (класс прибора 0). В табл. 1 представлен диапазон измеряемых газоанализатором значений.

Таблица 1

Диапазон измеряемых газоанализатором значений CO , CH , NO_x и пределы допускаемой погрешности

Измеряемая величина	Диапазон измерений	Пределы допускаемой погрешности	
		Абсолютной	Относительной
Объемная доля CH , млн ⁻¹	От 0 до 2000	±10	±5
Объемная доля NO_x , млн ⁻¹	От 0 до 4000	±100	±10

Table 1

Range of CO , CH , NO_x values measured by the gas analyzer and limits of permissible error

Measured value	Measuring range	Limits of error	
		Absolute	Relative
Volume fraction of CH , ppm	From 0 to 2000	±10	±5
Volume fraction of NO_x , ppm	From 0 to 4000	±100	±10

Подготовку прибора к работе и проведение контроля содержания в ОГ CH и NO_x осуществляли, руководствуясь соответствующей технической документацией. Так, устройство забора пробы (зонд) газоанализатора устанавливали в выхлопную трубу двигателя, согласно инструкции, на глубину не менее 300 мм от среза и фиксировали устройство забора пробы специальным зажимом. Кроме измерения CH и NO_x , регистри-

ровали обороты коленчатого вала (тахометром). Сопоставление объемных концентраций CH и NO_x в ОГ проводили по данным, полученным при работе двигателя в режиме холостого хода на частотах (n) 2200–2800 об·мин⁻¹.

Пробы бензина объемом не выше 150 мл заливали в топливный бак одноцилиндрового, четырехтактного, верхнеклапанного двигателя (Biggs & Stratton) мощностью 7,4 кВт (крутящий момент 3600 об·мин⁻¹). Рабочий объем двигателя 306 см³.

Испытание проб топлива проводили после предварительной процедуры прогрева двигателя. Моментом окончания опыта служила полная остановка двигателя, которая была обусловлена отсутствием подачи бензина в камеру сгорания из-за малого его содержания в топливном баке. Время, затраченное на проведение одного эксперимента, не превышало 10 минут. Рассчитанный расход топлива составил не более 0,9 л·час⁻¹.

2. Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований установлено, что измеренные индикатором ОКТАН-ИМ октановые числа бензинов составляют 95,1–97,0 о. е. (табл. 2). С учетом погрешности измерения (± 2 о. е.) такие значения ОЧИ вполне соответствуют заявленным производителем топлива величинам октанового числа, равного 95.

Определение индикатором ОКТАН-ИМ октанового числа основано на измерении комплексной диэлектрической проницаемости бензина ($\epsilon_{\text{комп}}$) [8–12].

Этот метод (диэлькометрия) относится к косвенному однофакторному способу определения ОЧ. Математическая модель, описывающая связь октановых чисел с $\epsilon_{\text{комп}}$, не только нелинейная, но и содержит внутренние противоречия. К ним относят большой вклад в $\epsilon_{\text{комп}}$ диэлектрических проницаемостей арен (имеющих более высокое, чем у иных углеводородов, значение ϵ) и существенную зависимость ОЧ от содержания в бензинах этих веществ [10]. Установлено, что диэлькометрия имеет максимальную чувствительность для бензинов с октановыми числами 88–93 о. е. Чувствительность метода для топлива, имеющего ОЧ выше 95, падает. Затруднения в распознавании указных марок связаны с присутствием в высокооктановых бензинах изооктана, изопентана и бутанов, которые при высоком октановом

числе компаунда имеют низкую диэлектрическую проницаемость [9].

Принимая во внимание особенности диэлькометрии, следует заключить, что вещества, улучшающие свойства инновационных и высококачественных сортов топлива не оказывают влияние на результат измерения октанового числа бензина.

Таблица 2

Октановые числа бензинов

Показатель	Бензин			
	Б-1	БИН-2	БВК-3	Б-4
Октановое число по исследовательскому методу – ОЧИ	96,8	95,4	97,0	95,1

Table 2

Octane numbers of gasolines

Index	Gasoline			
	G-1	IG-2	HQG-3	G-4
Research octane number – RON	96.8	95.4	97.0	95.1

В табл. 3 приведены показатели исследованных проб бензинов, а в табл. 4 табличный протокол перегонки пробы бензина Б-4. Плотность бензинов, температура конца кипения, остаток в колбе и кислотность соответствуют нормам ГОСТ. Аналогичный вывод следует и из сопоставления данных (табл. 3) с нормативными значениями температур и объемной доли испарившегося бензина. Следовательно, полугодовой срок хранения образцов топлива никак не сказывается на параметрах горючего, его физической и химической стабильности.

В испытаниях с использованием раствора перманганата калия установлено, что после введения реактива в пробы топлив со временем происходит изменение цвета водного раствора KMnO_4 . Лиловый окрас перманганата калия исчезает, и в растворе, который приобретает коричневый цвет, появляются бурые хлопья. Через сутки в приготовленных таким образом образцах бурые хлопья не исчезают, раствор становится бесцветным. Наблюдаемые в опытах с перманганатом калия эффекты изменения цвета водного раствора и образование бурых хлопьев свидетельствуют о том, что в бензинах присутствуют углеводороды с двойной химической связью. Такими углеводородами в бензинах в первую очередь являются олефиновые углеводороды.

Таблица 3

Плотность ρ , кислотность K , температура конца кипения проб топлива $t_{\text{кк}}$ и остаток в колбе

Бензин	ρ , кг·м ⁻³ при 15 °С*	Остаток в колбе, %**	$t_{\text{кк}}$, °С***	K , мг КОН на 100 мл бензина****
Б-1	743	1,1	205	0,56
БИН-2	750	1,2	205	1,68
БВК-3	737	1,1	196	0,56
Б-4	750	1,0	194	1,68

Примечание: * плотность при 15 °С по нормам ГОСТ 32513–2013 составляет 720–780 кг·м⁻³; ** остаток в колбе, % (по объему) не более 2 (ГОСТ 32513–2013); *** конец кипения, °С не выше 2150С (ГОСТ 32513–2013); **** кислотность, мг КОН на 100 см³, не более 3 (ТУ 38.001.165–87).

Table 3

Density ρ , acidity K , end boiling point of fuel samples t_{bc} and flask residue

Gasoline	ρ , kg·m ⁻³ at 15 °С*	Residue in the flask, %**	$t_{\text{end of boiling}}$, °С***	K , mg KOH at 100 ml gasoline****
G-1	743	1.1	205	0.56
IG-2	750	1.2	205	1.68
HQG-3	737	1.1	196	0.56
G-4	750	1.0	194	1.68

Note: * density at 15 °С according to GOST 32513–2013 is 720–780 kg·m⁻³; ** residue in the flask, % (by volume) no more than 2 (GOST 32513–2013); *** end of boiling, °С not higher than 215 °С (GOST 32513–2013); **** acidity, mg KOH per 100 cm³, not more than 3 (TU 38.001.165–87).

Таблица 4

Табличный протокол перегонки пробы бензина Б-4 (V-объемная доля испарившегося бензина)

Параметр	Температура перегонки, °С											
	55	61	70	90	100	118	123	130	144	158	171	193
V, %*	10	20	30	40	45	60	65	70	75	80	85	95

Примечание: * объемная доля испарившегося бензина, %, при температуре (ГОСТ 32513–2013): 70 °С составляет 15–50; 100 °С составляет 40–70; 150 °С составляет не менее 75.

Table 4

Tabular protocol for the distillation of a sample of gasoline G-4 (V is the volume fraction of evaporated gasoline)

Parameter	Distillation temperature, °С											
	55	61	70	90	100	118	123	130	144	158	171	193
V, %*	10	20	30	40	45	60	65	70	75	80	85	95

Note: * volume fraction of evaporated gasoline, %, at temperature (GOST 32513–2013): 70 °С is 15–50; 100 °С is 40–70; 150 °С is at least 75.

Таблица 5

Кислотность различных марок бензина, сроки хранения проб топлива τ

Показатель	Бензин						
	Б-1	БИН-2	БВК-3	Б-4	БИН-95	Б-92	Б-100
K , мг КОН на 100 мл бензина	0,56	1,68	0,56	1,68	3,36	7,28	8,96
τ , год	0,5	0,5	0,5	0,5	2,42	2,66	2,75

Table 5

Acidity of various grades of gasoline, shelf-life fuel samples τ

Index	Gasoline						
	G-1	IG-2	HQG-3	G-4	IG-95	G-92	G-100
K , mg KOH per 100 ml of gasoline	0.56	1.68	0.56	1.68	3.36	7.28	8.96
τ , year	0.5	0.5	0.5	0.5	2.42	2.66	2.75

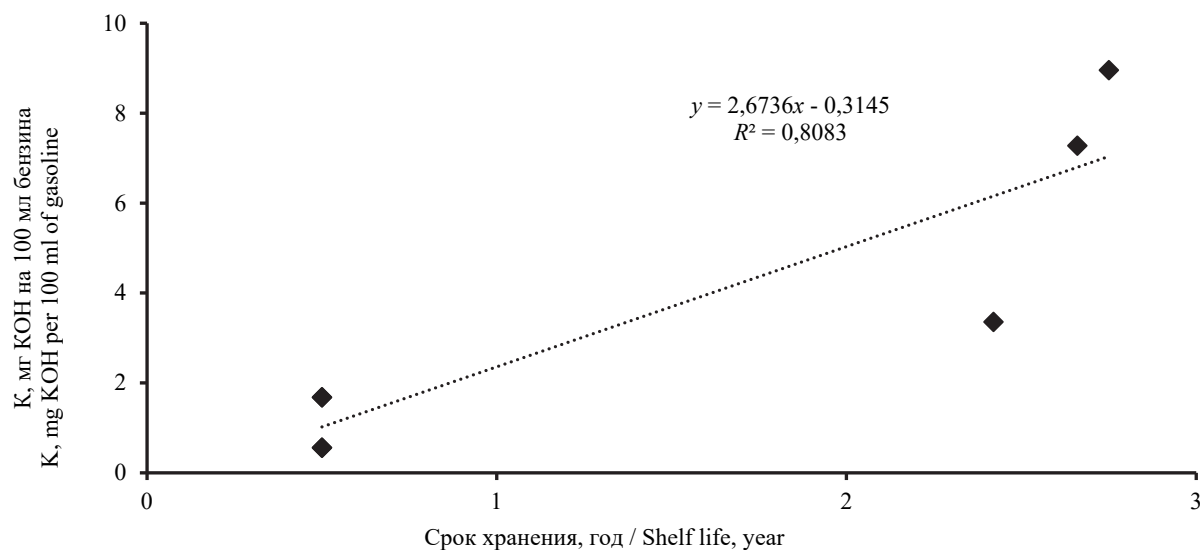


Рис. 1. Диаграмма рассеяния и линейная аппроксимация данных посредством построения линии тренда
Figure 1. Scatterplot and linear approximation of data by plotting a trend line

Таблица 6

Уравнение регрессии, величина достоверности аппроксимации R^2 характеристики линейной модели

Регрессия	$\bar{A}, \%*$	$R^2_{\text{скорр}} **$	$F_{\text{расч}} ***$	$F_{\text{крит}} ****$	R^2
$\hat{y} = 2,6736x - 0,3145$	50,7	0,7699	21,1	6,6	0,8083

Примечание: * средняя относительная ошибка аппроксимации; ** скорректированный коэффициент детерминации; *** расчетное значение критерия Фишера; **** критическое значение критерия Фишера.

Table 6

Regression equation, approximation confidence value R^2 of linear model characteristics

Regression	$\bar{A}, \%*$	$R^2_{\text{adjusted}} **$	$F_{\text{calculated}} ***$	$F_{\text{critical}} ****$	R^2
$\hat{y} = 2.6736x - 0.3145$	50.7	0.7699	21.1	6.6	0.8083

Note: * average relative approximation error; ** adjusted coefficient of determination; *** calculated value of the Fisher criterion; **** critical value of the Fisher criterion.

Замечено, что в бензине Б-4 изменение цвета водного раствора KMnO_4 и появление хлопьев происходит намного быстрее, чем в пробах Б-1, БИН-2 и БВК-3. Причем и их количество намного ниже присутствующих в других пробах хлопьевидных образований. Это отличие, так же как и разница температур конца кипения, более высоких (БВК-3, Б-1) по сравнению с Б-4, свидетельствует о том, что октановые числа являются отражением особенностей компонентного состава бензинов.

В табл. 5 приведены данные кислотности различных марок бензинов и сроки их хранения.

Из сопоставления данных (табл. 5) следует, что в значениях кислотности и сроков хранения

образцов топлива просматривается определенная тенденция. Кислотность возрастает с увеличением срока хранения проб бензинов.

Статистико-математическую обработку данных проводили с помощью статистических функций и надстроек «Пакет анализа», «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Office Excel³ [13; 14].

³ 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.; Ляховецкий А.М., Кремянская Е.В., Климова Н.В. Статистика: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2016. 362 с.; Кадочникова Е.И. Эконометрика: конспект лекций. Казань: Казанский федеральный университет, 2013. 106 с.

Оценку связи между кислотностью бензина и сроком его хранения проводили корреляционным методом анализа, расчетом коэффициента корреляции. Коэффициент парной корреляции $r_{расч}$ составил 0,899. Характер силы связи K с τ , проведенный с использованием шкалы Чеддока, оценивается как сильный. Статистическую значимость параметра $r_{расч}$ проводили путем сравнения абсолютной величины $r_{расч}$ с критической (табличной) величиной $r_{крит}$. Установлено, что с заданной степенью вероятности (95 %) $|r_{расч} > r_{крит}|, r_{крит} = 0,754$. Следовательно, можно утверждать, что между K и τ существует значимая линейная связь, или гипотеза о значимости линейной связи не отвергается.

Для проверки наличия функциональной линейной зависимости K от τ , а также прогнозирования величин кислотности бензина, зависящих от срока хранения топлива, использовали регрессионный анализ, основанный на линейной аппроксимации данных (табл. 4) посредством построения линии тренда (рис. 1).

В табл. 6 представлены уравнение регрессии, величина достоверности аппроксимации (R^2) и характеристики линейной модели.

Точность математической модели оценивают по величине ошибки аппроксимации. Высокая точность модели характеризуется значениями \bar{A} ниже 10 %. Таким значением линейная модель не обладает (табл. 6).

Среднюю относительную ошибку аппроксимации рассчитывали по формуле⁴

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| 100, \quad (1)$$

где n – число измерений; y_i – экспериментальное значение; \hat{y}_i – теоретическое (расчетное) значение.

Проверку статистической значимости уравнения регрессии проводили по критерию Фишера $F_{расч}$. Табличное значение критерия Фишера (критическое значение $F_{крит}$) определяли с помощью встроенной функции Excel «ФРАСПОБР» при уровне значимости 0,05.

Критерием статистической значимости (адекватности) уравнений регрессии является усло-

вие, при котором $F_{расч} > F_{крит}$. Для данных, приведенных в табл. 5, $F_{расч} > F_{крит}$. Следовательно, линейная модель статистически значима. Большая величина средней относительной ошибки аппроксимации, а также низкое значение скорректированного (нормированного) коэффициента детерминации не позволяют применить полученную модель для прогнозирования. Модель пригодна для принятия только некоторых решений.

Расчет характеристик линейной модели можно проводить не только используя соответствующие формулы, но и функцией «Регрессия» надстройки «Пакет анализа» (рис. 2).

Из сопоставления данных (табл. 5) следует, что для бензинов со сроком хранения 0,5 года кислотность никак не связана с маркировкой, будь то инновационный, высококачественный или обычный бензин. Однако в ряду K от τ кислотность БИН-95 (инновационный бензин) со сроком хранения 2,42 года ниже кислотности Б-92, Б-100 со сроком хранения, незначительно отличающимся от указанной величины τ (табл. 5). Это может свидетельствовать о том, что химическая стабильность улучшенных сортов бензина выше, чем у традиционного топлива.

Полноту сгорания взятых на испытание проб бензинов оценивали, как это отмечено ранее, по содержанию в отработавших газах негоревших углеводородов СН. Влияние особенностей компонентного состава топлива на указанный процесс проводили, измеряя и анализируя содержание в ОГ оксидов азота NO_x .

На рис. 3 представлен фрагмент табличного протокола с регистрируемыми газоанализатором данными СН и NO_x .

Из анализа приведенных значений содержания в ОГ оксидов азота следует, что отработавшие газы, образующиеся при сгорании топлива БИН-2, не содержат NO_x (рис. 3). В отработавших газах, возникающих при сгорании других бензинов, содержание NO_x изменяется от 0 до 68 млн⁻¹. Аналогичные флуктуации величин содержания наблюдаются и для СН. Например, в ОГ, образующихся при сгорании БИН-2, содержание СН с 173 млн⁻¹ сначала падает до 163 млн⁻¹, а потом возрастает до 191 млн⁻¹ (рис. 3). Иллюстрирует такие колебания приведенное на рис. 4 изменение содержания СН ($\Delta C(CH)$) в отработавших газах, образующихся при сгорании топлива БИН-2.

⁴ Воскобойников Ю.Е. Эконометрика в EXCEL...

Вывод итогов / RESULTS								
Регрессионная статистика / Regression statistics								
Множественный R / Multiple R	0,899065759							
R-квадрат / R-square	0,808319239							
Нормированный R-квадрат / Normalized R-square	0,769983087							
Стандартная ошибка / Standard error	1,61465281							
Наблюдения / Observations	7							
Дисперсионный анализ / Analysis of variance								
	df	SS	MS	F	Значимость F / Significance F			
Регрессия / Regression	1	54,97088152	54,97088152	21,08503839	0,005883741			
Остаток / Remainder	5	13,03551848	2,607103696					
Итого / Total	6	68,0064						
	Коэффициенты / Coefficients	Стандартная ошибка / Standard Error	t-статистика / t-Statistic	P-Значение / P-Value	Нижние 95% / Lower 95%	Верхние 95% / Upper 95%	Нижние 95% / Lower 95%	Верхние 95% / Upper 95%
Y-пересечение / Y-intersection	-0,314465956	1,02028182	-0,308214798	0,770345928	-2,937183869	2,308251958	-2,93718387	2,308251958
Переменная X 1 / Variable X 1	2,673576978	0,582244634	4,59184477	0,005883741	1,176869498	4,170284457	1,176869498	4,170284457

Рис. 2. Инструмент анализа «Регрессия» табличного процессора Microsoft Office Excel
 Figure 2. Analysis tool “Regression” spreadsheet Microsoft Office Excel

БИН-2 / IG-2	БИН-2 / IG-2	БВК-3 / HQG-3	БВК-3 / HQG-3	Б-1 / G-1	Б-1 / G-1	Б-4 / G-4	Б-4 / G-4	Время, с / Time, s
СН, ppm	NOx, ppm	СН, ppm	NOx, ppm	СН, ppm	NOx, ppm	СН, ppm	NOx, ppm	
173	0	232	17	312	0	487	0	1
173	0	230	0	301	1	487	30	2
173	0	229	0	294	1	487	23	3
173	0	228	18	292	34	487	34	4
173	0	228	0	292	0	485	42	5
173	0	226	0	291	51	485	68	6
173	0	226	10	288	40	470	31	7
173	0	226	0	283	64	470	34	8
173	0	226	21	278	15	461	38	9
173	0	226	33	274	70	454	1	10
173	0	226	0	274	20	449	0	11
173	0	226	25	271	36	449	0	12
170	0	226	0	266	0	446	0	13
170	0	226	0	258	6	444	0	14
167	0	226	0	252	0	441	0	15
165	0	226	0	252	0	438	0	16
164	0	226	0	251	1	438	0	17
163	0	226	0	251	0	434	0	18
163	0	234	0	252	33	430	0	19
163	0	243	0	255	0	427	8	20
163	0	250	7	262	52	424	0	21
163	0	250	0	262	0	419	0	22
163	0	256	0	272	49	419	0	23
163	0	261	1	284	0	410	0	24
163	0	265	0	295	7	410	0	25
166	0	268	16	300	0	406	17	26
172	0	268	0	300	0	403	14	27
177	0	268	0	304	0	403	0	28
184	0	268	0	311	6	400	21	29
191	0	260	0	320	6	394	9	30
191	0	254	0	324	0	394	23	31

Рис. 3. Фрагмент табличного протокола данных, полученных при испытании топлив
 Figure 3. Fragment of the tabular protocol of data obtained during fuel testing

Флуктуации, представленные на рис. 4, не позволяют по среднему арифметическому значению провести корректно сравнительную оценку содержания СН и NO_x в ОГ двигателя, работающего на исследуемых образцах топлива. Поэто-

му было принято решение рассчитать методом трапеций площадь под полученными при испытании бензинов кривыми:

$$S = \int_a^b f(x)dx \approx h \left[\frac{f(x_0)+f(x_n)}{2} + f(x_1) + f(x_2) + \dots + f(x_{n-1}) \right], \quad (2)$$

где h – шаг интегрирования ($h = \frac{b-a}{n} = 1 \text{ с}$); $f(x_i)$ – значения подынтегральной функции в точках $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n$.

В табл. 7 приведены результаты проведенного с помощью формулы трапеций интегрирования.

Из сопоставления данных (табл. 7) следует, что при сгорании традиционных бензинов площадь под кривыми содержания в отработавших газах СН и NO_x выше аналогичного параметра, полученного для инновационного и высококачественного сортов топлива. Следовательно, по такому показателю, как полнота сгорания, инновационный и высококачественный бензины превосходят бензины, не содержащие веществ, улучшающих горение. Подобный вывод можно сделать и для оксидов азота, содержание которых связано с присутствием в бензине компонентов, повышающих температуру газов, возникающих в камере сгорания силового агрегата. Необходимо отметить, что площадь с такой размерностью (млн⁻¹·с) следует отнести к условно-

му показателю содержания в отработавших газах СН и NO_x. Несмотря на условность параметра *S*, входящие в соотношение 2 значения функции $f(x_i)$ различны. Так, максимальное значение СН в отработавших газах, образующихся

при сгорании БИН-2, составило 248 млн⁻¹, а при сгорании Б-1 – 668 млн⁻¹. Эти отличия, отражаясь в величине площади, создают однозначное соответствие параметра *S* содержанию в отработавших газах СН и NO_x.

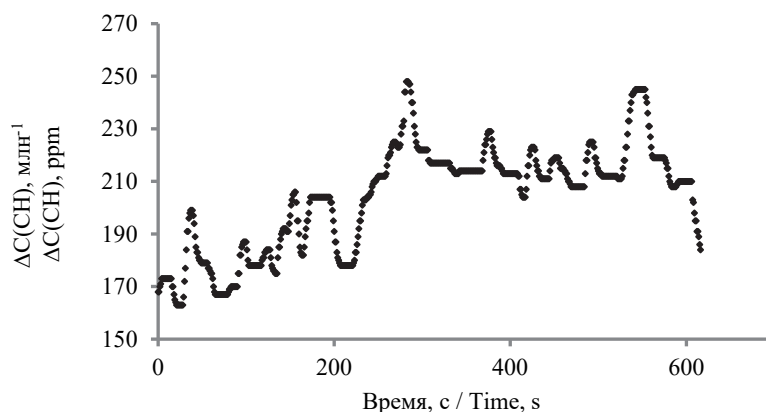


Рис. 4. Изменение содержания СН ΔC(CH) от времени проведения опыта (посекундная запись показаний регистратора) в отработавших газах, образующихся при сгорании топлива БИН-2
Figure 4. Change in the content of CH ΔC(CH) from the time of the experiment (second-by-second recording of the recorder readings) in the exhaust gases generated during the combustion of fuel IG-2

Таблица 7

Рассчитанные методом трапеций площади под кривыми зависимостей содержания СН и NO_x от времени проведения опыта

Газ	Бензин			
	Б-1	БИН-2	БВК-3	Б-4
S(CH), млн ⁻¹ ·с	145 844	71 861	101 461	286 171
S(NO _x), млн ⁻¹ ·с	9282	0	924	5638

Table 7

Calculated by the trapezoidal method, the areas under the curves of dependences of the content of CH and NO_x on the time of the experiment

Gas	Gasoline			
	G-1	IG-2	HQG-3	G-4
S(CH), ppm·s	145 844	71 861	101 461	286 171
S(NO _x), ppm·s	9282	0	924	5638

Заключение

Представленные в исследовании результаты показали, что плотность бензинов, температура конца кипения, остаток в колбе и кислотность соответствуют нормам ГОСТ. Полугодичный срок хранения образцов топлива никак не сказывается на параметрах горючего, его физической и химической стабильности. Показано, что вещества, улучшающие свойства инновационных и высококачественных сортов топлива, не оказывают влияние на результат измерения октанового числа бензина. Установлено, что химическая стабиль-

ность улучшенных сортов бензина выше, чем у традиционного топлива. Показано, что по полноте сгорания инновационный и высококачественный бензины превосходят бензины, не содержащие веществ, улучшающих горение. Подобный вывод можно сделать и для оксидов азота, содержание которых связано с присутствием в бензине компонентов, повышающих температуру газов, возникающих в камере сгорания силового агрегата. Показано, что инновационный и высококачественный бензины улучшают эксплуатационные и экологические качества топлива.

Список литературы

1. Гаврилов Н.В., Дуров О.В. Получение экологически чистых бензинов, соответствующих евростандартам // Химия и технология топлив и масел. 2008. № 6. С. 9–14.

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. Скворцов Б.В., Силов Е.А. Исследование корреляционных зависимостей между октановым числом и электродинамическими параметрами углеводородных продуктов // Известия Самарского центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 5. С. 64–71.

4. Ramadhas A.S., Singh V.P., Subramanian M., Acharya G.K., Basu B., Malhotra R.K. Impact of fuel additives on intake valve deposits, combustion chamber deposits and emissions. *SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting*. 2011. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1980>

5. Borzaev B.K., Karpov S.A., Kapustin V.M. Multifunctional additives for automotive gasolines // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2007. Vol. 43. Pp. 108–113. <https://doi.org/10.1007/s10553-007-0021-y>

6. Котов С.В., Тыщенко В.А., Овчинников К.А., Баклан Н.С., Тимофеева Г.В., Гусева И.А., Еремин М.С. Многофункциональная присадка к высококачественным бензинам // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2017. № 10. С. 15–19.

7. Лазарев И.С., Кабанов А.Н. Переход России к производству высококачественного бензина европейского качества и логистические аспекты его перевозок // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т. 29. № 2 (161). С. 123–125.

8. Скворцов Б.В., Силов Е.А., Солнцева А.В. Определение взаимосвязи показателей детонационной стойкости с электродинамическими параметрами углеводородных топлив на основе статистического моделирования компонентного состава // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 1 (21). С. 166–173.

9. Руднев В.А., Бойченко А.П., Карножицкий П.В. «TOP-DOWN» подход для оценки неопределенности измерений диэлектрической проницаемости неводных растворителей и их многокомпонентных смесей // Вестник Харьковского национального университета. Химия. 2010. Т. 19. № 932. С. 160–169.

10. Николаев В.Ф. Экспресс-методы тестирования композиционных продуктов нефтепромысловых химии и моторных топлив: монография. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. 124 с.

11. Мачулин Л.В. Проблемы экспресс-определения октанового числа и пути его решения // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2013. № 9. С. 13–18.

12. Мачулин Л.В. Сравнительная характеристика прямых и косвенных методов определения октанового числа // Газовая промышленность. 2014. № 9. С. 100–105.

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

14. Абдуллин Р.З., Абдуллин В.Р. Эконометрика в MS Excel. Практикум. Иркутск: Изд-во БГУ, 2016. 135 с.

References

1. Gavrilo NV, Durov OV. Production of ecologically clean gasolines meeting european standards. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2008;44(6):379–385. <https://doi.org/10.1007/s10553-009-0083-0>

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

3. Skvorcov BV, Silov EA. Research of correlation dependences between octan number and electrodynamic parameters of hydrocarbonic products. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2009;11(5):64–71. (In Russ.)

4. Ramadhas AS, Singh VP, Subramanian M, Acharya GK, Basu B, Malhotra RK. Impact of fuel additives on intake valve deposits, combustion chamber deposits and emissions. *SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting*. 2011. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1980>

5. Borzaev BK, Karpov SA, Kapustin VM. Multifunctional additives for automotive gasolines. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2007;43:108–113. <https://doi.org/10.1007/s10553-007-0021-y>

6. Kotov SV, Tyschenko VA, Ovchinnikov KA, Baklan SN, Timofeeva GV, Guseva IA, Eremin MS. Multifunctional additive for high-quality gasoline. *World of Petroleum Products*. 2017;(10):15–19. (In Russ.)

7. Lazarev IS, Kabanov AN. Transition of Russian petrol to European quality standards. Logistical aspects of transportation. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2015; 29(2):123–125. (In Russ.)

8. Skvortsov BV, Silov EA, Solntseva AV. Determination of the relationship of detonation resistance indicators with electrodynamic parameters of hydrocarbon fuels based on statistical modeling of component composition. *Bulletin of the Samara State Aerospace University*. 2010;(1):166–173. (In Russ.)

9. Rudnev VA, Boychenko AP, Karnozhitsky PV. A TOP-DOWN approach for estimating the uncertainty of permittivity measurements of non-aqueous solvents and their multicomponent mixtures. *Bulletin of Kharkiv National University. Chemistry*. 2010;19(932):160–169. (In Russ.)

10. Nikolaev VF. *Express methods of testing composite products of oilfield chemistry and motor fuels*. Kazan: KNITU Publ.; 2012. (In Russ.)

11. Machulin LV. The problem of quick determination of octane number and the ways of its solution. *Neftepererabotka i Neftekhimiya. Nauchno-Tekhnicheskie Dostizheniya i Peredovoj Opyt*. 2013;(9):13–18. (In Russ.)

12. Machulin LV. Direct and indirect octane methods: comparisons. *Gas Industry*. 2014;(9):100–105. (In Russ.)

13. Baraz VR, Pegashkin VF. *Using MS EXCEL to analyze statistical data*. 2nd ed., revised and add. Nizhny Tagil: NTI (branch) UrFU; 2014. (In Russ.)

14. Abdullin RZ, Abdullin VR. *Econometrics in MS Excel: practicum*. Irkutsk: BSU Publ.; 2016. (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

Асоян Артур Рафикович, доктор технических наук, профессор департамента транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; профессор кафедры эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-кт, д. 64; ORCID: 0000-0002-1976-9376, Scopus Author ID: 57207115973, eLIBRARY SPIN-код: 1020-5089; asoyan-ar@rudn.ru

Истомин Данил Владиславович, магистрант, департамент транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-0232-2025; 1032212204@rudn.ru

Алибекова Джейран Руслановна, магистрант, департамент транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-3541-9517; 1032212205@rudn.ru

Нарожный Алексей Алексеевич, магистрант, департамент транспорта, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-3395-2871; 1032212206@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

Artur R. Asoyan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; Professor of the Department of Operation of Road Transport and Car Service, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 64 Leningradskii Prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-1976-9376, Scopus Author ID: 57207115973, eLIBRARY SPIN-code: 1020-5089; asoyan-ar@rudn.ru

Danil V. Istomin, 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: 0000-0002-0232-2025; 1032212204@rudn.ru

Djeqran R. Alibekova, 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: 0000-0003-3541-9517; 1032212205@rudn.ru

Alexey A. Narozhnyi, 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: 0000-0002-3395-2871; 1032212206@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-322-335
УДК 532.517.2


Научная статья / Research article

Сопряжения закрученного потока с продольным течением

Г.В. Орехов^a , Л.Е. Щесняк^b 

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

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 orehov_genrih@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 29 сентября 2022 г.

Доработана: 12 ноября 2022 г.

Принята к публикации: 15 ноября 2022 г.

Ключевые слова:

моделирование, циркуляционно-продольное течение, завихритель, скорость потока, затопленная струя, численный эксперимент

Аннотация. В практике проектирования и эксплуатации гидротехнических и водохозяйственных объектов вопросы сопряжения потоков зачастую приобретают первостепенный характер, поскольку требуют внимательного подхода к воздействию на береговую инфраструктуру водных объектов и их сооружений со стороны различного рода течений и струй. Изучено сложное течение в виде затопленной струи, образованной сопряжением циркуляционно-продольного (закрученного) потока с массивом воды, имеющим относительную продольную скорость течения. Исследования проводились посредством математического и физического моделирования. Для выполнения лабораторных экспериментов создан испытательный стенд с моделью для получения циркуляционно-продольного потока и потока с продольной скоростью течения, который формировался в гидравлическом лотке. Численный эксперимент проведен в программном комплексе ANSYS (Fluent). Получены поля и распределения скоростей результирующего течения. Сделан выбор в пользу наиболее благоприятного в плане гидродинамического воздействия на береговую инфраструктуру. Дана оценка точности расчетов численным методом на основе сравнения с результатами физического эксперимента.

Для цитирования


Орехов Г.В., Щесняк Л.Е. Сопряжения закрученного потока с продольным течением // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 322–335. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-322-335>

Interference of swirling flow with longitudinal stream

Genrikh V. Orekhov^a , Leonid E. Shchesnyak^b 

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

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

 orehov_genrih@mail.ru

Article history

Received: September 29, 2022

Revised: November 12, 2022

Accepted: November 15, 2022

Abstract. In the practice of designing and operating hydraulic and water management facilities, the issues of flow interference are of paramount importance, since they require close attention to the effect of various currents and jets on the coastal infrastructure of water bodies. A complex flow

© Орехов Г.В., Щесняк Л.Е., 2022



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

Keywords:

simulation, circulating longitudinal flow, swirl, flow velocity, submerged jet, numerical experiment

in the form of a submerged jet, which is formed by the interference of a circulating longitudinal (swirling) flow with a water body having a relative longitudinal flow velocity, was studied. The investigation was carried out using mathematical and physical modeling. To perform laboratory experiments, a test bench with a model for obtaining swirling flow and a longitudinal stream, which was formed in a hydraulic flume, was created. The numerical experiment was carried out using ANSYS (Fluent) software. The fields and velocity distributions of the resulting flow were obtained. The most favourable one in terms of hydrodynamic impact on the coastal infrastructure was chosen. The accuracy of numerical computation is evaluated by comparing with the results of the physical experiment.

For citation

Orekhov GV, Shchesnyak LE. Interference of swirling flow with longitudinal stream. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):322–335. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-322-335>

Введение

В практике гидротехнического строительства, обоснования возведения различных водохозяйственных объектов и проектов преобразования водных ресурсов, рассмотрения русловых режимов рек и искусственных водных систем вопросы сопряжения потоков занимают важное место [1–6]. После создания гидроузлов нарушаются естественные условия прохождения паводков; они сбрасываются через водопропускные сооружения, геометрические размеры которых обычно меньше ширины потока в русле реки, со скоростями значительно большими, чем скорость течения воды в естественных условиях. При сопряжении бьефов гидротехнических сооружений могут сбрасываться большие расходы воды, которые при взаимодействии с водными массами оказывают силовые воздействия на сооружения и природную систему реки в нижнем бьефе.

В гидротехнике при проектировании гидроузлов с высокими напорами водосбросные системы выполняют в виде напорных трубопроводов или туннелей. К основным особенностям сопряжений трубчатых или туннельных водосбросов можно отнести:

– плавное сопряжение трубчатых водосбросов с водобойным колодцем с помощью открытых лотков, устраиваемых непосредственно за водосбросами. Течение характеризуется числами Фруда больше единицы;

– плавное сочленение концевых донных участков трубчатых и туннельных водосбросов, на выходе которых спокойное течение с устройствами нижнего бьефа. Такое течение характеризуется числами Фруда меньше единицы;

– сопряжение трубчатых водосбросов с водобойным колодцем, имеющим специальные гасители энергии;

– сопряжение глубинных водосбросов с помощью отброса струи в естественное или закрепленное русло.

Системы сопряжения различных потоков применяются не только в гидротехническом и водохозяйственном строительстве. Такие узлы сопряжений жидкостных потоков наблюдаются и в других отраслях промышленности, где широко используются различные жидкости, как правило, в напорном режиме течения.

Рассеивание («гашение») избыточной кинетической энергии потока в основном происходит за счет его турбулизации при образовании вихревых структур, соударении струй, при динамическом воздействии на препятствия и при перемещении частиц грунта русла реки при процессах эрозии (размыва) [7–10]. Значительные потери энергии сбросного потока происходят в водоворотных зонах с образованием возвратно-поступательных течений. Одними из наиболее эффективных и широко применяемых гасителей являются: устройство гидравлического прыжка, гашение кинетической энергии с помощью отброса струи и при растекании потока в плане [11–13].

При сопряжении потоков могут рассматриваться различные режимы течений. Наиболее распространенный режим сопряжения – безнапорный. В ряде случаев сопряжение может быть выполнено в виде затопленной струи, взаимодействующей с неподвижным массивом воды в нижнем бьефе или с массивом, имеющим скорость течения. Взаимодействие двух потоков

может происходить по нормали друг к другу или под углом. Различные случаи таких сопряжений могут рассматриваться при проектировании гидротехнических сооружений в процессе анализа вариантов компоновочных схем гидроузлов и водных объектов. В этих случаях на практике возникают вопросы, связанные с гидравлическими режимами и параметрами течения взаимодействующих сопрягающихся потоков.

В большинстве случаев водосбросные системы при сопряжении бьефов гидротехнических объектов формируют сбросные потоки в режиме продольного осевого течения. Однако в последнее время в ряде случаев стали применяться водосбросы с закруткой потока и созданием продольно-циркуляционных режимов течения воды в проточном тракте канала [14], что позволяет плавно по всей длине водосброса гасить избыточную кинетическую энергию потока. Такие системы также носят название вихревых. Разновидностью вихревых водосбросов являются контрвихревые системы с вращением потоков относительно различных осей или с соосным вращением потоков, которые показали высокую эффективность гашения потока внутри проточного тракта [15].

Применение таких водосбросных систем может формировать условия, при которых в водный массив нижнего бьефа, покоящийся илидвигающийся с какой-то скоростью, попадает поток с закруткой потока. При этом гидравлический режим взаимодействующих потоков будет отличаться от вышеупомянутых режимов сопряжения продольно-осевых потоков.

В настоящем исследовании рассматриваются вопросы моделирования сопряжения двух потоков: 1) в виде затопленной струи с закруткой (например, остаточная закрутка после вихревого водосброса); 2) более массивный, безнапорный, имеющий скорость течения. Расчетными случаями является варианты взаимодействия потоков под разными углами.

1. Цель

Потоки воды, являющиеся результатом взаимодействия продольно-циркуляционной струи с массивом воды, обладающим скоростью, представляют собой сложные в структурном отношении течения. Течения в зоне взаимодействия имеют высокие значения турбулентности и характеризуются пространственным полем скорос-

тей. Поэтому исследования таких течений выполняются двумя способами: математическим и физическим моделированием. Оба способа, будучи приближенными методами решения задач гидроаэродинамики, дополняют и корректируют друг друга.

Цель исследования – изучить сложное течение, формируемое двумя взаимодействующими потоками, один из которых представляет собой затопленную закрученную струю, методами физического и математического (численного) моделирования. В качестве основного измерительного метода на физической модели использован метод визуализации потока с определением скоростных характеристик современной измерительной аппаратурой, позволяющей получить основные кинематические характеристики изучаемого течения.

Решались задачи:

1) исследования на физической модели гидродинамических характеристик распространения затопленной закрученной струи:

– в неподвижном массиве воды;

– в массиве воды с относительной скоростью течения (при этом ось струи расположена по нормали к вектору скорости массива воды);

– в массиве воды со скоростью течения (при этом ось струи расположена под разными углами к направлению вектора скорости массива воды);

2) исследования методом математического моделирования (вычислительный эксперимент) сложного течения, образованного затопленной закрученной струей, и массива воды нижнего бьефа гидроузла.

2. Материалы и методы

Метод физического моделирования для решения поставленных задач

Исследования взаимодействующих потоков в области сопряжения затопленной закрученной струи и массива воды в нижнем бьефе проводились с помощью специализированного стенда, основным элементом которого является открытый гидравлический лоток, имитирующий условия течения в нижнем бьефе гидроузла. На рис. 1 показан экспериментальный гидравлический стенд для проведения серии модельных испытаний.

Исследования выполнялись в открытом гидравлическом лотке с размерами проточной части $18 \times 1,37 \times 0,8$ м, оборудованном: технологическим

баком для хранения воды и слива в него потока из лотка объемом 30 м^3 ; регулировочными задвижками (верхний и нижний затвор) на входе и выходе водослива; насосом, обеспечивающим подачу воды из технологического бака с расходом $0,0022 \text{ м}^3/\text{с}$; ультразвуковым расходомером КАРАТ-520 для измерения расхода воды через водосброс лотка. Гидравлический лоток имеет прозрачные стенки для наблюдения за результатами опытов.

На вертикальной боковой поверхности лотка смонтирован патрубок, имитирующий выходной участок водосбросной системы гидроузла. Патру-

бок укреплен на стенке лотка на расстоянии 9 м от входного сечения, через которое вода поступает в лоток через специальный мерный водослив. Назначение такой длины обеспечивает снижение до минимума турбулентных возмущений в зоне эксперимента, возникающих во входном сечении лотка. Ось цилиндрического патрубка установлена на глубине 270 мм от дна лотка.

На рис. 2 показан узел крепления патрубка к стенке гидравлического лотка под углом 30° . Всего в серии исследований рассмотрено три варианта выхода закрученного потока из патрубка в текущий в лотке поток воды: 30 , 45 и 90° .



Рис. 1. Гидравлический стенд для проведения модельных испытаний на физической модели
Figure 1. Hydraulic bench for conducting physical model tests



а



б

Рис. 2. Монтаж патрубка к стенке гидравлического лотка:
а – общий вид крепления патрубка к стенке; *б* – один из вариантов сопряжения патрубка к стенке лотка под углом 30°
Figure 2. Nozzle to hydraulic tray wall mount:
а – general view of nozzle attachment; *б* – an option for nozzle to wall mount at 30° angle

В эксперименте закрученные потоки создавались при помощи патрубков диаметром 50 мм

с плотно установленными в них завихрителями длиной 300 мм. Завихрители изготовлены с ис-

пользованием аддитивных технологий трехмерной печати на аппарате ProdwaysX4500. Путем экспериментального подбора завихрителей создавалась закрутка потока с различными параметрами. Параметр закрутки принимался в пределах 0,25–0,35, что соответствует числу Хигера – Бэра, определенному по формуле

$$Sn = \frac{M}{RI} = \frac{\int_0^R \rho r u_{\theta} u_x 2\pi r dr}{R \int_0^R \rho u_x^2 2\pi r dr},$$

где M и I – момент количества движения и количество движения циркуляционно-продольного течения соответственно; ρ – плотность жидкости; r – текущий радиус патрубка; R – внутренний радиус патрубка, принятый в проведенных опытах 25 мм; u_{θ} и u_x – тангенциальные (окружные) и осевые (продольные) скорости течения соответственно.

Момент количества движения M и количества движения I соответственно определялись по формулам

$$M = \int_0^R \rho r u_{\theta} u_x 2\pi r dr;$$

$$I = \int_0^R \rho u_x^2 2\pi r dr.$$

На рис. 3. показаны модели завихрителей, применявшихся в опытах. Завихрители выполнены в виде четырехзаходных шнековых спиралей с центральным цилиндрическим телом и разным шагом закрутки шнековых лент для изменения характеристик закрученного потока воды, выходящего в гидравлический лоток из патрубка.

Измерение скоростей потока выполнялось ручным акустическим доплеровским измерителем скорости течения 3D FlowTracker2 LAB, предназначенным для лабораторных исследований (рис. 4). Для обработки сигнала и получения необходимых данных прибор подключается к обрабатывающему компьютеру. Технические характеристики прибора приведены в таблице.

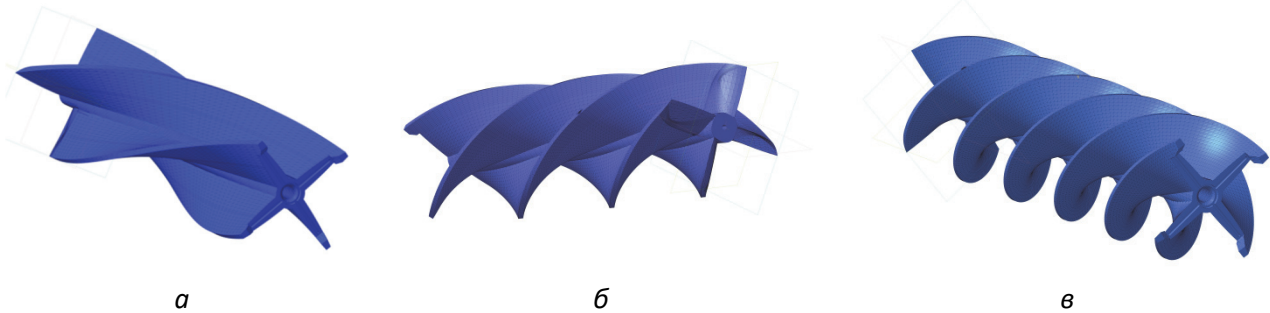


Рис. 3. Модели завихрителей для создания закрученного потока в патрубке модели диаметром 50 мм:
а – большой шаг; б – средний шаг; в – малый шаг
Figure 3. Models of swirlers for creating swirling flow in 50 mm diameter nozzle:
a – large step; б – medium step; в – small step

Принцип действия ультразвукового измерителя скорости FlowTracker2 основан на использовании эффекта Доплера. Схема измерения показана на рис. 5. Результаты измерения скорости представляются с использованием правосторонней декартовой системы координат, привязанной к зонду. Градуированная направляющая располагается перпендикулярно потоку, над сечением, в точках которого должна быть определена скорость потока. Количество точек измере-

ния зависит от ширины потока. Средний временной интервал измерения скорости в точке обычно составляет от 10 до 60 секунд и зависит от особенностей потока. Спокойный, без особых возмущений поток требует меньшего интервала времени измерения скорости в выбранной точке. Напротив, бурный поток с возмущениями и вихревыми зонами требует большего времени. Прибор делает два измерения в секунду по трем компонентам скорости: v_x , v_y , v_z .



Рис. 4. Акустический измеритель скорости потока FlowTracker2: внешний вид
Figure 4. Flow Tracker 2 acoustic flow meter: appearance

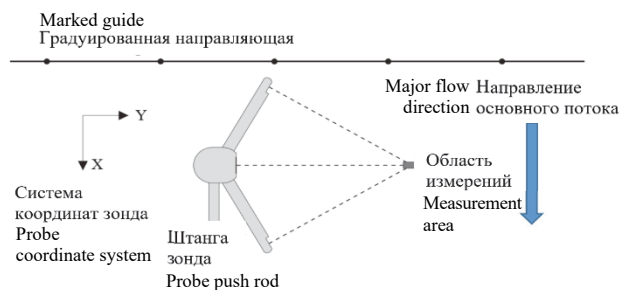


Рис. 5. Принципиальная схема измерения скорости жидкостного потока
Figure 5. Liquid flow rate measurement schematic

Основные характеристики прибора FlowTracker2

Характеристика	Значение параметров
Диапазон скорости	От $\pm 0,001$ до 4,0 м/с
Разрешение скорости	0,0001 м/с
Точность определения скорости	$\pm 1\%$ от измеренной скорости
Акустическая частота	10,0 МГц
Положение объема выборки	10 см от центра трансдюсера
Минимальная глубина погружения	0,02 м
Диапазон измерения глубины	от 0 до 10 м
Разрешение измерения глубины	$\pm 0,001$ м

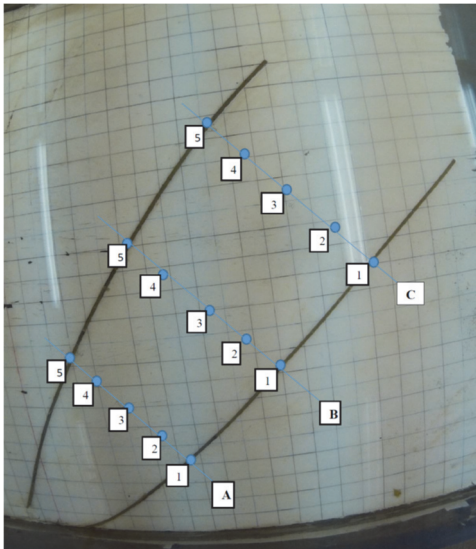
Main characteristics of FlowTracker2 device

Characteristic	Parameter values
Velocity range	From ± 0.001 to 4.0 m/s
Velocity resolution	0.0001 m/s
Velocity detection accuracy	$\pm 1\%$ of measured velocity
Acoustic frequency	10.0 MHz
Position of sample volume	10 cm from transducer center
Minimum immersion depth	0.02 m
Depth measurement range	From 0 m to 10 m
Depth measurement resolution	± 0.001 m

Измерения скоростных характеристик струи в текущем потоке производились в трех сечениях и пяти точках в каждом сечении. Установка измерительного прибора в гидравлическом лотке и разметка на дне лотка точек измерения показаны на рис. 6.

Получение информации о характеристиках течения осуществлялось не только с помощью измерительного прибора, но и визуальным спо-

собом. Визуализация включала окрашивание закрученной струи воды и определение границ окрашенной зоны в области взаимодействия двух потоков. Фиксировались границы проникновения закрученной струи, выходящей из патрубка, в протекающем массиве воды в гидравлическом лотке. На рис. 7 показана технология визуализации потока применительно к решаемой задаче.



a



б

Рис. 6. Установка зонда и разметка поля измерения:

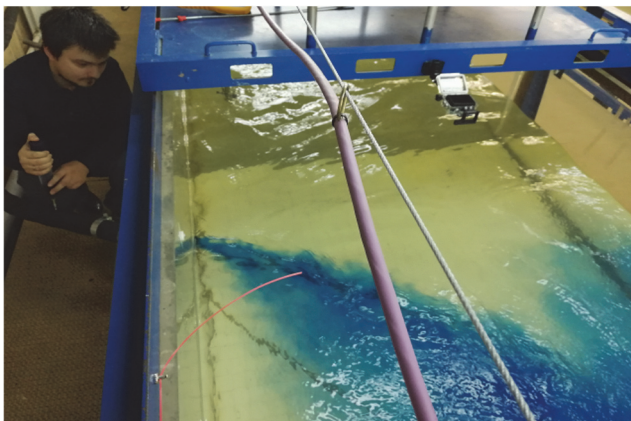
a – разметка дна гидравлического лотка для установки измерительного прибора в точку измерения;

б – крепление прибора к подвижной штанге, осуществляющей перемещение по горизонтали и вертикали

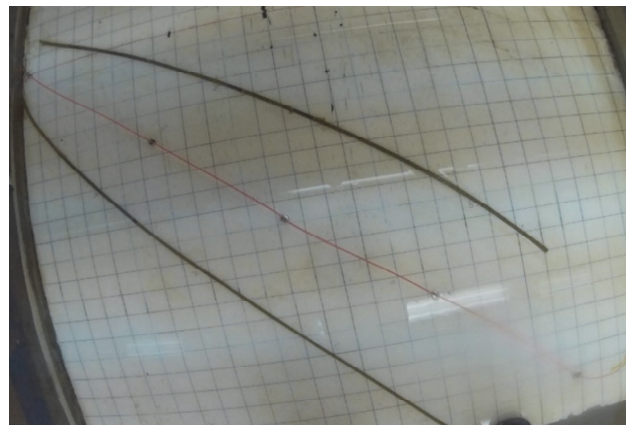
Figure 6. Probe setup and measurement field marking:

a – marking of hydraulic tray bottom for installing measuring device to point of measurement;

б – device attachment to mobile rod that moves horizontally and vertically



a



б

Рис. 7. Технология визуализации потока:

a – окрашивание закрученной струи; *б* – разметка осевой линии и границ рассеивания закрученной струи в массиве текущей воды

Figure 7. Flow visualization technique:

a – swirling jet coloring; *б* – marking of centerline and scattering boundaries of swirling jet in flowing water body

Метод математического (численного) моделирования для решения поставленных задач

В задачах гидродинамики в качестве модели используются краевые задачи для уравнений в частных производных. Такие задачи редко решаются аналитически, поэтому обычно применяют численные методы решения дифференциальных уравнений Навье – Стокса [16–20].

Применение метода сеток подразумевает, что масштабный порядок шага суммирования решения может быть хорошо аппроксимирован линейными

функциями, но в турбулентных задачах это предположение не выполняется. Методы, основанные на прямом решении уравнений Навье – Стокса, в инженерных расчетах не используются. В настоящее время поступают следующим образом. Сначала вводится разложение Рейнольдса между средней и флуктуирующей (турбулентной) компонентами, которое применяется к уравнениям Навье – Стокса, в результате чего получаются так называемые усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса [21–23]. Получается незамкнутая система диф-

ференциальных нелинейных уравнений. Способ их замыкания выполняется по-разному, что приводит к разным моделям турбулентного течения. Известные методы замыкания основаны на определенных предположениях, обоснование которых представляет значительные трудности и содержит параметры, определяемые эмпирическим путем.

Для расчетов используется стандартный пакет Fluent в ANSYS 19.0 для работы с моделями турбулентных течений. Этот программный продукт обеспечивает доступ ко многим пакетам, ориентированным на моделирование явлений из различных областей физики, но объединенным общей идеей – дискретизацией уравнений в частных производных методом конечных элементов (МКЭ). Выбор этой расчетной программы в первую очередь обусловлен тем, что компания ANSYS Inc. была создана в 1970 г. специально для разработки программного обеспечения для МКЭ и накопила большой опыт в этом вопросе. В настоящее время Fluent ANSYS является наиболее известным и универсальным программным расчетным продуктом для моделирования турбулентных течений.

Циркулярно-продольный (закрученный) поток описывается как течение в круглоцилиндрической трубе, диаметр которой равен внутреннему диаметру патрубка в физической модели, описанной выше. На входе исходного продольно-осевого потока устанавливалась численная модель завихрителей (рис. 2) для формирования продольно-циркуляционного (закрученного) потока на выходе из круглоцилиндрической проточной части. Массив воды нижнего бьефа, имеющий скорость движения, моделировался в виде прямоугольного параллелепипеда, и его размеры меньше физической модели в целях экономии вычислительных ресурсов. На рис. 8 показана картина течения в круглоцилиндрическом канале в области расположения завихрителей.

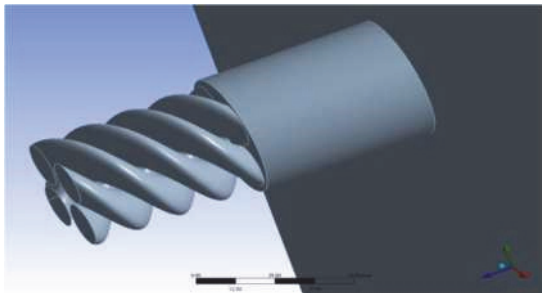


Рис. 8. Картина течения в круглоцилиндрическом канале в области расположения завихрителей
Figure 8. Flow pattern in circular cylindrical channel near swirlers

Решение задачи основано на уравнениях движения и неразрывности с усреднением по Рейнольдсу (усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, RANS)

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0;$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\delta}{\partial x_i} + \frac{\delta}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} + \rho \tau_{ij}), \quad (1)$$

где U – осредненные скорости, а

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right). \quad (2)$$

В расчетах использовались модели турбулентности k - ε и k - ω . В процессе работы с программой выбиралась более подходящая к данной задаче модель. Кинетическая энергия турбулентных пульсаций определялась как

$$K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (3)$$

и скорость диссипации

$$\varepsilon = V \frac{\overline{\delta u'_i}}{\partial x_k} \frac{\overline{\delta u'_i}}{\partial x_k}. \quad (4)$$

В рамках модели предполагается, что тензор напряжений Рейнольдса выражается через функции следующим образом:

$$\tau_{ij} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (5)$$

где кинематическая вязкость ν_T определяется из соображений размерности как

$$\nu_T = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon \nu_T}. \quad (6)$$

Коэффициент C_μ в (6) принимался равным 0,009.

Динамика энергии K описывается уравнениями

$$\frac{\delta k}{\delta t} + U_j \frac{\delta k}{\delta x_j} = \tau_{ij} \frac{\delta U_i}{\delta x_j} - \varepsilon + \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\delta k} \right) \frac{\delta k}{\delta x_j} \right];$$

$$\frac{\delta \varepsilon}{\delta t} + U_j \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_j} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\delta}{\delta x_j} \left[\left(v + \frac{v_T}{\delta \varepsilon} \right) \frac{\delta \varepsilon}{\delta x_j} \right], \quad (7)$$

где $\varepsilon = 1,0$, а коэффициенты в (7) равны $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

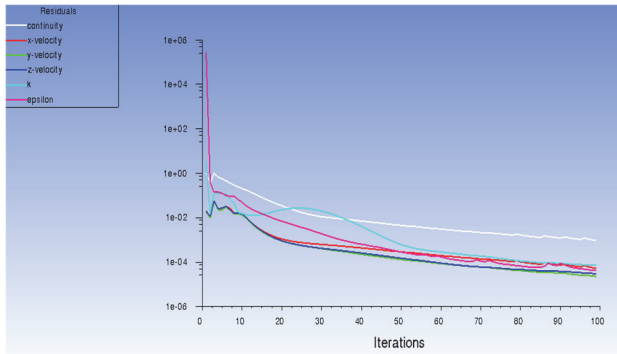


Рис. 9. Сходимость k – ε модели для псевдопереходного решателя

Figure 9. Convergence of k – ε model for pseudo-transient solver

Рассмотрены две модели турбулентности k – ε и k – ω . Модель k – ω показала неудовлетворительные результаты по сходимости. Модель k – ε имеет лучшие результаты по сходимости решений. На рис. 9 представлен график, иллюстрирующий характер сходимости итерационных процессов. Применение псевдопереходного решателя позволяет достичь сходимости по всем невязкам уже за 100 шагов.

3. Результаты и обсуждение

Результаты численного эксперимента по исследованию сопряжения двух потоков показаны на рис. 9–11. На этих диаграммах приведены результаты расчетов выхода закрученного потока в массив воды, имеющий скорость продольного течения в плоскости x – z , совпадающей с

осью закрученного потока. Масштаб диаграмм отображает полную скорость течения, равную

$$U = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}.$$

На рис. 10, *a* показана картина течения при входе закрученного потока в массив движущейся воды под прямым углом. Циркуляционно-продольный (закрученный) поток, сформированный завихрителем в круглоцилиндрическом канале (трубе), взаимодействуя с текущим продольным массивом в канале, образует факел распределения скоростей, изгибающийся в направлении течения в канале. Видно, что скорости в факеле уменьшаются по мере удаления от условной осевой, показанной на рис. 10, *a* красной линией. В непосредственной близости от выхода продольно-циркуляционного потока из патрубка наблюдается проявление закрутки на характер распределения скоростей в факеле струйного течения.

При изменении угла взаимодействия двух потоков, картина меняется. На рис. 10, *b* показана диаграмма распределения полных скоростей U при наклоне выходного патрубка в плоскости x – z до 60° . Из диаграммы следует, что общий вид струйной области не изменился по сравнению с диаграммой на рис. 10, *a*, но область на выходе из патрубка приобрела большую длину со скоростями порядка 0,8 м/с.

На рис. 11 показаны диаграммы распределения полных скоростей струйного течения с углами взаимодействия потоков 45° и 30° . Общая структура струйного течения остается неизменной, но области проникновения продольно-циркуляционной струи в массив движущейся воды в канале увеличиваются. Это особенно видно на рис. 11, *a* при входе закрученного потока в канал под углом 30° .

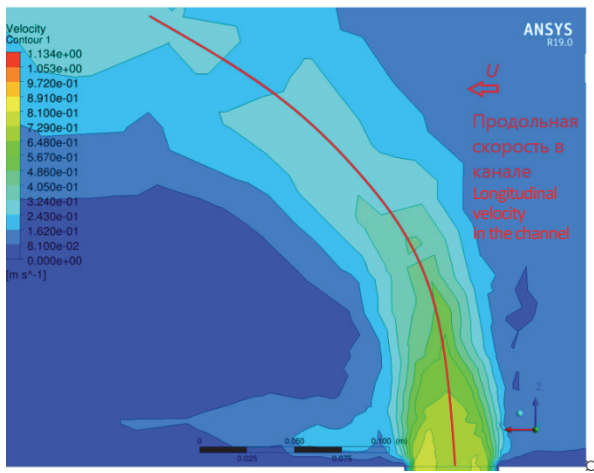
На рис. 12 показаны диаграммы распределения компоненты полной скорости v_y и линии тока. На диаграмме хорошо видно распределение скоростей на участке течения «выходной» патрубков – массив сносящего потока» в канале. Параметры закрутки циркуляционно-продольного течения за счет вязкого трения довольно быстро полностью вырождаются на длине струи, равной 3–4 диаметрам патрубка.

Закрученный поток, взаимодействуя с течением реки, формирует траектории, зависящие от

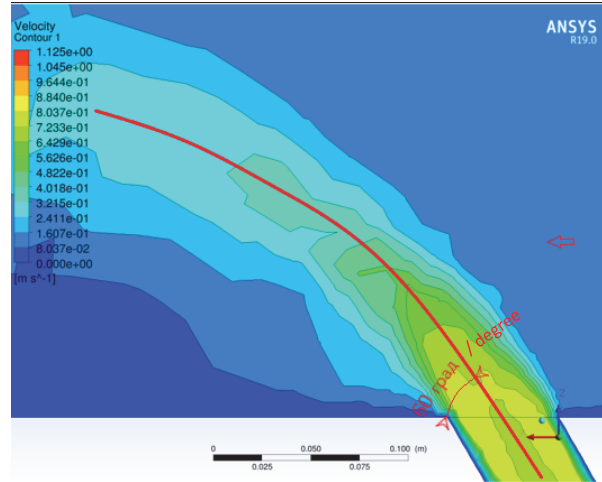
угла сопряжения водосброса с массивом воды в нижнем бьефе гидроузла.

При прямом угле сопряжения закрученный поток сохраняет свое направление на расстоянии, равном примерно трем диаметрам патрубка. Далее он получает отклонение в результате взаимодействия с продольным течением и достигает противоположной границы канала. При этом в

реальных условиях может происходить размыв береговой линии, что потребует проведения берегоукрепительных мероприятий. В районе выходного сечения патрубка и выхода закрученного потока в канал появляются две характерные области: область с большой по модулю скоростью располагается над осью потока, а область с почти нулевой скоростью – под осью.



а



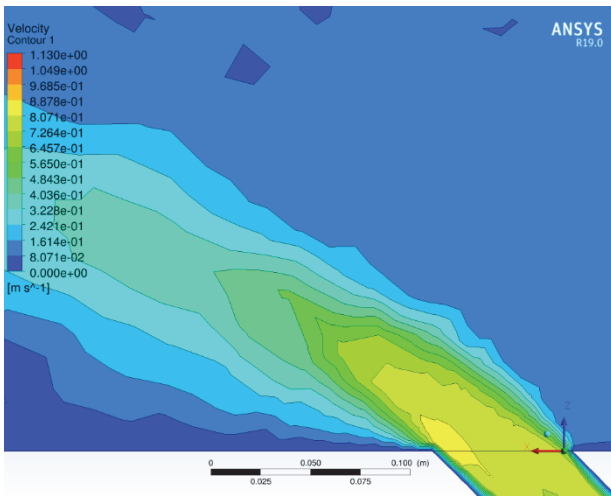
б

Рис. 10. Диаграммы распределения полных скоростей в горизонтальной плоскости $x-z$:

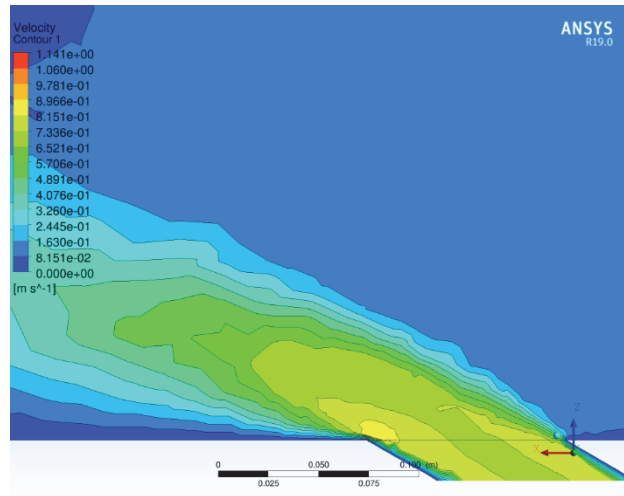
а – выход затопленного закрученного потока в движущийся массив под прямым углом; б – выход затопленного закрученного потока в движущийся массив воды под углом 60° ; угол образован стенкой канала и осью циркуляционно-продольного (закрученного) потока

Figure 10. Diagrams of total velocity distribution in horizontal $x-z$ plane:

а – 90° nozzle-stream angle flow; б – 60° nozzle-stream angle flow; angle is formed by channel wall and longitudinal axis of submerged swirling jet



а



б

Рис. 11. Диаграммы распределения полных скоростей в горизонтальной плоскости $x-z$:

а – выход затопленного закрученного потока в движущийся массив под углом 45° ; б – выход затопленного закрученного потока в движущийся массив воды под углом 30° ; угол образован стенкой канала и осью циркуляционно-продольного (закрученного) потока

Figure 11. Diagrams of total velocity distribution in horizontal $x-z$ plane:

а – 45° nozzle-stream angle flow; б – 30° nozzle-stream angle flow; angle is formed by channel wall and longitudinal axis of submerged swirling jet

При углах сопряжения 60° и 45° закрученный поток отклоняется от своей первоначальной тра-

ектории и не соприкасается с границами канала. Такое распространение потока является предпо-

читительным. При угле сопряжения 30° закрученный поток сильно отклоняется от первоначальной траектории таким образом, что его граница соприкасается с ближней границей канала.

С точки зрения минимизации влияния кинетической энергии закрученной струи на русло канала углы сопряжения 60° и 45° представляются предпочтительными. Поэтому для более подробного рассмотрения был выбран угол сопряжения 45° , для которого построены сравнительные графики распределения компонент скоростей по сечениям струи (см. рис. 5, а).

Выполнено сравнение результатов численного и натурального экспериментов. На рис. 12 и 13

показаны значения компонент v_x , v_y , v_z полной скорости в принятой ортогональной координатной системе $x - y - z$, полученные на физической модели и с помощью численного эксперимента. На представленных трех графиках зависимости значений компонент скорости в выбранных точках сплошной линией показаны результаты численного эксперимента, а пунктирными линиями – физического.

Сравнение результатов физического и математического экспериментов показали, что они достаточно хорошо совпадают. Отклонения составляют не более 7 %, что соответствует требованиям к погрешности результатов инженерных расчетов.

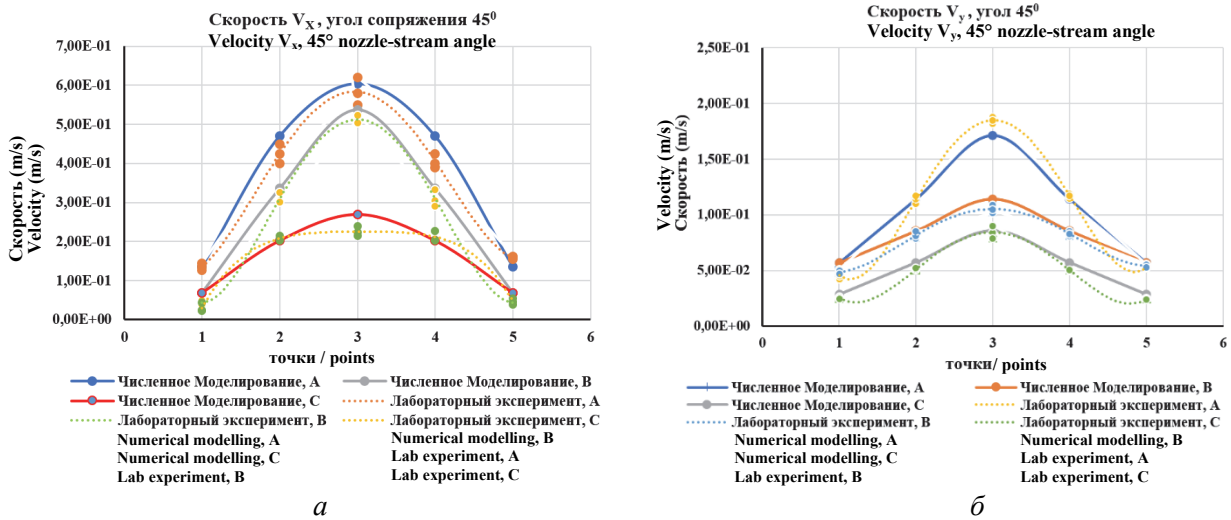


Рис. 12. Совмещенные графики распределения компоненты скорости по выбранным на физической модели точкам при угле сопряжения потоков 45° : а – компонента скорости v_x ; б – компонента скорости v_y

Figure 12. Combined graphs of velocity distribution over selected points in physical model at 45° nozzle-stream angle: а – velocity component v_x ; б – velocity component v_y

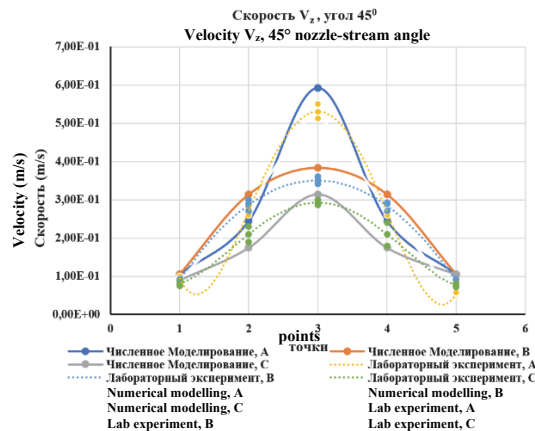


Рис. 13. Совмещенные графики распределения компоненты скорости v_z по выбранным на физической модели точкам при угле сопряжения потоков 45°
Figure 13. Combined graphs of velocity component v_z distribution over selected points in physical model at 45° nozzle-stream angle

Заключение

В выполненном исследовании реализован комплексный подход к решению гидравлической задачи сопряжения циркуляционно-продольного течения с массивом воды, имеющим продольное перемещение, который заключается в получении экспериментальной информации о течении с помощью физического и математического моделирования.

Исследовались различные режимы сопряжения двух потоков, отличающихся параметрами циркуляционно-продольного течения, углами взаимодействия и скоростями продольного течения.

Сравнение результатов расчетов течения численным методом показало хорошую сходимость с результатами, проведенными на физической модели. Невязка полученных данных двумя способами лежит в пределах допустимых для инженерных расчетов.

Верификация результатов математического моделирования с помощью физического эксперимента дает основание утверждать, что расчеты по выбранной программе Fluent ANSYS носят обоснованный и достоверный характер.

Выявлены отличия распространения криволинейной струи закрученного потока в массиве воды с относительной продольной скоростью. На основании полученных данных и характера распределения скоростей по длине струи установлено, что наибольший эффект от воздействия струи на границы водного массива наблюдается при углах установки выходного патрубка, равных 90 и 30°. При этих углах струя наиболее интенсивно воздействует на береговые откосы и гидротехнические сооружения нижнего бьефа, передавая им свою кинетическую энергию.

С точки зрения минимизации влияния кинетической энергии закрученной струи на русловую инфраструктуру нижнего бьефа углы сопряжения 60 и 45° представляются наиболее предпочтительными.

Список литературы

1. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А. Гидротехнические сооружения: в 2 ч. Ч. 1. М.: Изд-во АСВ, 2008. 576 с.

2. Слисский С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986, 304 с.

3. Бестужева А.С. Гидроэкология: в 2 ч. Ч. 2. Природоохранные сооружения речной гидротехники. М.: Изд-во МГСУ, 2017. 196 с.

4. Гурьев А.П., Ханов Н.В., Волгин Н.А. Влияние конструктивных параметров водобойного колодца на гашение энергии потока // Гидротехническое строительство. 2015. № 4. С. 48–51.

5. Аубакирова Ф.Х. Гашение избыточной энергии потока в водосбросных сооружениях при различных режимах сопряжения бьефов // Природообустройство. 2015. № 1. С. 37–41.

6. Prokofev V.A., Sudolskii G.A. Hybrid simulation of hydrodynamics of hydroelectric power plant spillway structures // Power Technology and Engineering. 2022. Vol. 55. Pp. 714–719. <https://doi.org/10.1007/s10749-022-01421-8>

7. Слива И.В., Ланин Г.Г. Авария на водосбросных сооружениях гидроузла Оровилл. Гидротехническое строительство // Гидротехническое строительство 2017. № 11. С. 44–51.

8. Волианик В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В., Чурилин П.С. Пропуск холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС: в 2 ч. Ч. 1 // Гидротехническое строительство. 2013. № 4. С. 51–56.

9. Волианик В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В., Чурилин П.С. Пропуск холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС (часть 2) // Гидротехническое строительство. 2013. № 5. С. 32–40.

10. Ахметов В.К., Волианик В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В. Моделирование и расчет контрвихревых течений. М.: Изд-во МГСУ, 2012. 252 с.

11. Брянская Ю.В., Маркова И.М., Остякова А.В. Гидравлика водных и взвешенных потоков в жестких и деформируемых границах. М.: Изд-во АСВ, 2009. 264 с.

12. Карелин В.Я., Кривченко Г.И., Мордасов А.П., Волианик В.В., Зуйков А.Л., Ахметов В.К. Физическое и математическое моделирование гидравлических процессов при исследовании крупных гидроузлов комплексного назначения. Л.: ВНИИГ, 1989.

13. Zhang W., Liu M., Zhu D. Z., Rajaratnam N. Mean and turbulent bubble velocities in free hydraulic jumps for small to intermediate Froude numbers // Journal of Hydraulic Engineering. 2014. Vol. 140. Issue 11. Article 04014055. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000924)

14. Mahzari M., Schleiss A. Dynamic analysis of anchored concrete linings of plunge pools loaded by high velocity jet impacts issuing from dam spillways // Dam Engineering. 2010. Vol. 20. Issue 4. Pp. 307–327.

15. Собин В.М., Ершов А.И. Исследование структуры и гидравлического сопротивления турбулентного закрученного потока в коротких трубах // Вестник

АН БССР. Серия: Физические и энергетические науки. 1972. № 3. С. 56–61.

16. Sangwha Y. Exact solution of Navier – Stokes equations // *International Journal of Advanced Research in Physical Science*. 2019. Vol. 6. Pp. 39–43.

17. Vellando P., Puertas J., Bonillo J., Fe J. Finite element solution of the Navier – Stokes equations using a SUPG formulation // *Advances in Computational Engineering and Sciences*. Tech Science Press, 2000. Pp. 856–861.

18. Alam M., Saha S. Normal stress differences and beyond – Navier – Stokes hydrodynamics // *The European Physical Journal Conferences*. 2017. Vol. 140. Article 11014. <http://doi.org/10.1051/epjconf/20171401101>

19. Ramm A.G. Solution of the Navier–Stokes problem // *Applied Mathematics Letters*. 2019. Vol. 87. Pp. 160–164. <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.07.034>

20. Willis A.P. The open pipe flow Navier – Stokes solver // *Software X*. 2017. Vol. 6. Pp. 124–127. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.05.003>

21. Westerweel J. Advanced experimental methods for turbulent shear flows // *Proceedings of the 6th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*. Seoul; 2009. p. 1003–1009. <https://doi.org/10.1615/TSP6.1600>

22. Teresa P., Perez J.R., Szasz R.Z., Rodriguez M.A., Castro F. Numerical modelling of flow pattern for high swirling flow. *EPJ Web of Conferences*. 2015. Vol. 92. Article 02059. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159202059>

23. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. СПб., 2001. 108 p.

References

1. Rasskazov LN, Orekhov VG, Aniskin NA. *Hydraulic structures* (part 1). Moscow: DIA Publ.; 2008. (In Russ.)

2. Slissky SM. *Hydraulic calculations of high-pressure hydraulic structures*. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1986. (In Russ.)

3. Bestuzheva AS. *Hydroecology. Part 2. Environmental protection structures of river hydraulic engineering*. Moscow: MGSU Publ.; 2017. (In Russ.)

4. Gurev AP, Hanov NV, Volgin NA. The influence of design factors of the stilling basin on the energy dissipation of the. *Prirodoobustrojstvo*. 2015;(4):48–51. (In Russ.)

5. Aubakirova FK. Dissipation of excess flow energy in spillway structures under various conditions of pools conjugation. *Prirodoobustrojstvo*. 2015;(1):37–41. (In Russ.)

6. Prokofev VA, Sudolskii GA. Hybrid simulation of hydrodynamics of hydroelectric power plant spillway structures. *Power Technology and Engineering*. 2022;55: 714–719. <https://doi.org/10.1007/s10749-022-01421-8>

7. Sliva IV, Lapin GG. Accident at the spillway structures of the Oroville hydroelectric complex. Hydro-

technical construction. *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2017;(11):44–51. (In Russ.)

8. Volshanik VV, Zuikov AL, Orekhov GV, Churin PS. Idling flow through the turbine unit of a medium- or high-pressure HPP (part 1). *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2013;(4):51–56. (In Russ.)

9. Volshanik VV, Zuikov AL, Orekhov GV, Churin P.S. Idling flow through the turbine unit of a medium- or high-pressure HPP (part 2). *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 2013;(5):32–40. (In Russ.)

10. Akhmetov VK, Volshanik VV, Zuikov AL, Orekhov GV. *Modeling and calculation of counter-vortex flows*. Moscow: MGSU Publ.; 2012. (In Russ.)

11. Bryanskaya YuV, Markova IM, Ostyakova AV. *Hydraulics of water and suspended flows in rigid and deformable boundaries*. Moscow: ASV Publ.; 2009. (In Russ.)

12. Karelin VYa, Krivchenko GI, Mordasov AP, Volshanik VV, Zuikov AL, Akhmetov VK. *Physical and mathematical modeling of hydraulic processes in the study of large hydraulic units for complex purposes*. Leningrad: B.E. Vedenev VNIIG Publ.; 1989. (In Russ.)

13. Zhang W, Liu M, Zhu DZ, Rajaratnam N. Mean and turbulent bubble velocities in free hydraulic jumps for small to intermediate Froude numbers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2014;140(11):04014055. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000924)

14. Mahzari M, Schleiss A. Dynamic analysis of anchored concrete linings of plunge pools loaded by high velocity jet impacts issuing from dam spillways. *Dam Engineering*. 2010;20(4):307–327.

15. Sobin VM, Ershov AI. Investigation of the structure and hydraulic resistance of turbulent swirling flow in short pipes. *Bulletin of the Academy of Sciences of the BSSR. Series: Physical and Energy Sciences*. 1972;(3):56–61. (In Russ.)

16. Sangwha Y. Exact solution of Navier – Stokes equations. *International Journal of Advanced Research in Physical Science*. 2019;6:39–43.

17. Vellando P, Puertas J, Bonillo J, Fe J. Finite element solution of the Navier – Stokes equations using a SUPG formulation. *Advances in Computational Engineering and Sciences*. Tech Science Press; 2000 p. 856–861.

18. Alam M, Saha S. Normal stress differences and beyond – Navier – Stokes hydrodynamics. *The European Physical Journal Conferences*. 2017;140:11014. <http://doi.org/10.1051/epjconf/201714011014>

19. Ramm AG. Solution of the Navier – Stokes problem. *Applied Mathematics Letters*. 2019;87:160–164. <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.07.034>

20. Willis AP. The open pipe flow Navier – Stokes solver. *Software X*. 2017;6:124–127. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.05.003>

21. Westerweel J. Advanced experimental methods for turbulent shear flows. *Proceedings of the 6th International*

Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena. Seoul; 2009. p. 1003–1009. <https://doi.org/10.1615/TSFP6.1600>

22. Teresa P, Perez JR, Szasz RZ, Rodriguez MA, Castro F. Numerical modelling of flow pattern for high

swirling flow. *EPJ Web of Conferences*. 2015;92:02059. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159202059>

23. Belov IA, Isaev SA. *Modeling of turbulent flows*. St. Petersburg; 2001. (In Russ.)

Сведения об авторах

Орехов Генрих Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-6900-2704, Scopus Author ID: 6602666140, eLIBRARI SPIN-код: 1166-7682; orehov_genrih@mail.ru

Щесняк Леонид Евгеньевич, директор центра аддитивных и порубежных технологий, Институт инновационных инженерных технологий, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-8075-9487; shchesnyak-le@rudn.ru

About the authors

Genrikh V. Orekhov, Doctor of Engineering Science, Professor of the Hydraulics and Hydraulic Engineering Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6900-2704, Scopus Author ID: 6602666140, eLIBRARI SPIN-code: 1166-7682; orehov_genrih@mail.ru

Leonid E. Shchesnyak, Director of the Additive and Edge Technology Center, Institute of Innovative Engineering Technologies, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8075-9487; shchesnyak-le@rudn.ru




DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-336-342
УДК 553.98

Научная статья / Research article

Особенности засоления продуктивных отложений углеводородов юга Восточно-Сибирской платформы

П.Н. Страхов , А.С. Пономаренко  

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
 anast.ponomarenko@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 6 августа 2022 г.
Доработана: 17 ноября 2022 г.
Принята к публикации: 20 ноября 2022 г.

Ключевые слова:

фильтрационно-емкостные свойства, пустотное пространство, разработка залежей углеводородов, постседиментационные процессы

Аннотация. Актуальность исследования заключается в необходимости восполнения ресурсной базы углеводородов России за счет освоения месторождений южной части Восточно-Сибирского региона. Продуктивные горизонты на территории характеризуются повышенной неоднородностью, которая во многом обусловлена постседиментационными процессами. Цель исследования – изучение результатов развития процессов галитизации (эпигенетическое заполнение галитом пустотного пространства пород). Материалом послужили данные литолого-петрофизических исследований ядра, на основе которых произведен статистический анализ засоленных пород и построены соотношения между фильтрационно-емкостными свойствами и содержанием галита в палеопустотном пространстве для продуктивных горизонтов. Заполнение пустотного пространства вторичным галитом имеет не только отрицательное влияние на коллекторские свойства пород, но и негативно сказывается на самом процессе разработки залежей. Закачивание в пласт пресной воды провоцирует начало растворения кристаллов поваренной соли, развитие которого сопровождается выделением большого количества тепла, что в свою очередь повлечет за собой интенсивное осаждение в пустотном пространстве кристаллов кальцита, так как в пласте широко распространены карбонатные воды. В результате ухудшатся фильтрационно-емкостные свойства продуктивных пород вплоть до изоляции ряда нефтегазонасыщенных тел от основной дренирующей системы продуктивных горизонтов, что негативно повлияет на коэффициент извлечения нефти и, следовательно, на эффективность освоения залежей углеводородов.

Для цитирования

Страхов П.Н., Пономаренко А.С. Особенности засоления продуктивных отложений углеводородов юга Восточно-Сибирской платформы // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 336–342. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-336-342>



Features of filling productive hydrocarbon deposits in the south of the East Siberian platform

Pavel N. Strakhov , Anastasia S. Ponomarenko  

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

 anast.ponomarenko@gmail.com

Article history

Received: August 6, 2022

Revised: November 17, 2022

Accepted: November 20, 2022

Keywords:

salinization, reservoir properties, void, oil development, gas development, postsedimentation

Abstract. The relevance of the research lies in the need to replenish the resource base of hydrocarbons in Russia through the development of deposits in the southern part of the East Siberian. Productive horizons in the area are characterized by increased non-uniformity, which is largely due to post-sedimentation processes. The aim of the work is to study the results of the development of halitization processes (epigenetic filling of the void space of rocks with halite). The material for the study was the data of lithological and petrophysical studies of the core, on the basis of which a statistical analysis of saline rocks was performed and the relations between reservoir properties and halite content in the paleovoids for productive horizons were constructed. Filling the void space with secondary halite has not only a negative impact on the reservoir properties of rocks, but also negatively affects the process of developing deposits. Injection of fresh water into the reservoir will cause the beginning of dissolution of salt crystals, the development of which is accompanied by the release of a large amount of heat, which in turn will entail intensive deposition of calcite crystals in the void space, since carbonate waters are widespread in the formation. As a result, the reservoir properties of productive rocks will deteriorate up to the isolation of a number of oil and gas-saturated bodies from the main drainage system of productive horizons, which will negatively affect the oil recovery coefficient and, consequently, the efficiency of the development of hydrocarbon deposits.

For citation

Strakhov PN, Ponomarenko AS. Features of filling productive hydrocarbon deposits in the south of the East Siberian platform. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):336–342. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-336-342>

Введение

Вопрос освоения месторождений углеводородов, расположенных на территории Восточной Сибири, уже несколько десятилетий достаточно остро стоит перед нефтегазодобывающей отраслью. Начало функционирования трубопроводного транспорта Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО) значительно повышает актуальность реализации данного процесса.

Объектом исследования стали юряхский, ботубобинский, хамакинский, талахский, преображенский и осинский терригенные и карбонатные продуктивные горизонты на территории Непско-Ботубобинской антеклизы. Одной из главных проблем освоения месторождений, приуроченных к данным горизонтам, являются сложно построенные коллекторы продуктивных отложений [1; 2].

Большое влияние на эффективность подготовки к разработке залежей нефти и газа оказали постседиментационное преобразования пород, возраст которых датируется как вендская эратема – кембрийская система [3; 4]. За время своего существования на данные отложения оказали воздействие такие процессы, как гравитационное уплотнение, вторичное минералообразование, выщелачивание, трещинообразование и заполнение поваренной солью пустотного пространства. Последнему фактору в предлагаемой работе уделяется особенное внимание [5–8].

Значительный вклад в исследование постседиментационных процессов внесли Г.Г. Шемин, Н.В. Мельников [5; 8]. Учеными в разные временные отрезки были рассмотрены и изучены структурно-тектоническое, литологическое строение, а также вопросы по геохимии и нефтегазо-

ности территории. Однако реализованные проекты по изученности территории ввиду сложности горно-геологического строения и недостаточности полных исследований современными методами носят преимущественно региональный характер, что дает только общее представление о строении территории и перспективах нефтегазоносности. Уделялось недостаточное внимание изучению коллекторских свойств и функциональных неоднородностей, при этом проведенные геофизические исследования скважин и кернового материала носят локальный характер для залежей исключительно внутри участков месторождений.

Цель исследования – изучить результаты развития процессов эпигенетического засоления пустотного пространства пород, которые необходимы для проведения поисково-разведочных работ и оценки ресурсов перспективных объектов. Для достижения цели решались следующие задачи: исследование соотношений фильтрационно-емкостных свойств и интенсивности эпигенетического засоления для выявления фильтрационных неоднородностей; определение интенсивности заполнения галитом пустотного пространства (что дает понимание о потенциальных барьерах для миграции флюидов); оценка ухудшения емкостных свойств в результате осаждения галита при определенных методах разработки продуктивных интервалов.

1. Материалы и методы

В исследовании применялся комплексный анализ геолого-геофизических данных, которые послужили основой для применения статистических методов с целью выявления явных и функциональных неоднородностей фильтрационно-емкостных свойств продуктивных отложений. Материалом для изучения послужили данные литолого-петрофизических исследований керна, на основе которых был произведен статистический анализ засоленных пород. Метод исследования носит эмпирический характер, поэтому построены соотношения между фильтрационно-емкостными свойствами и содержанием галита в палеопустотном пространстве для продуктивных горизонтов. Изучены шесть продуктивных горизонтов на основе литолого-петрофизических результатов исследований и результатов интерпретации ГИС по 34 скважинам. Обобщены результаты определений (по керну) пористости и проницаемости – 496 и 387 образцов соответственно.

2. Результаты и обсуждение

Рассматривалась не эвапоритовая толща кембрийской системы, перекрывающая продуктивные отложения и выполняющая роль региональной крышки [9–11], а характер заполнения вторичными кристаллами галита палеопустотного пространства.

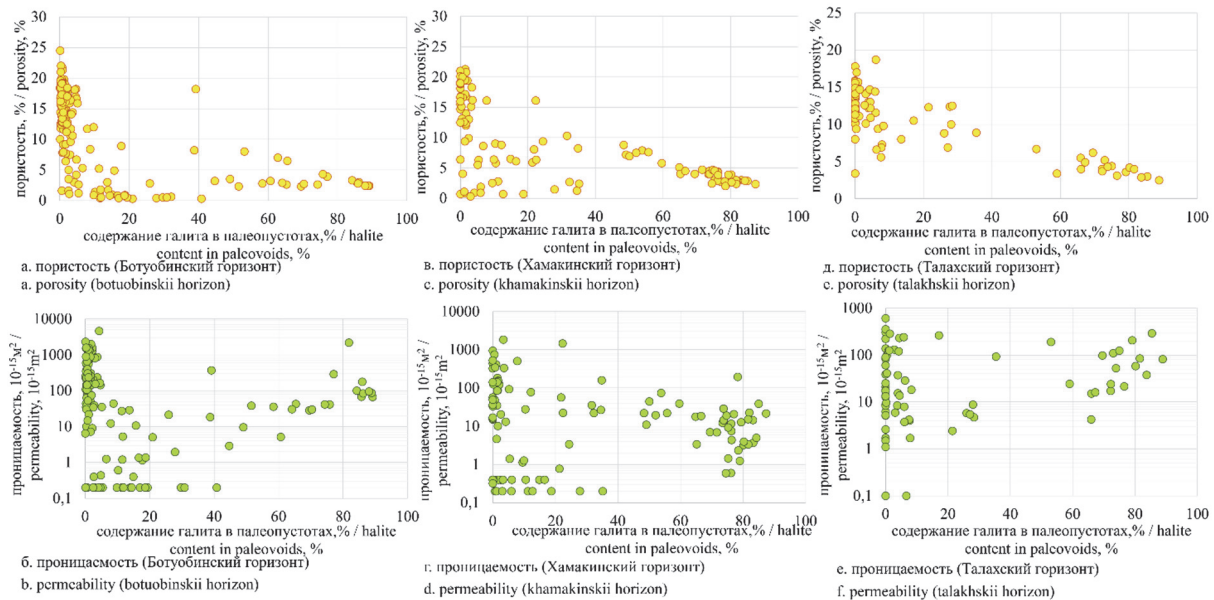


Рис. 1. Соотношение фильтрационно-емкостных свойств и интенсивности эпигенетического засоления терригенных пород Непско-Ботубинской антеклизы
Figure 1. Correlation of reservoir properties and intensity of epigenetic salinization of terrigenous rocks of the Nepsko-Botuobinskaya anteclise

Данный факт обуславливает необходимость учета ряда факторов. Во-первых, происходит локальное ухудшение коллекторских свойств продуктивных отложений, что формирует фильтрационные неоднородности, способствующие осложнению фронта вытеснения углеводородов в ходе разработки залежей. В целом прослеживается существенное ухудшение коллекторских свойств в результате данных преобразований (рис. 1).

Наиболее четко, что представляется логичным, это прослеживается при сопоставлении интенсивности проявления данных преобразований и пористости продуктивных отложений. Увеличение содержания вторичного галита в пустотном палеопространстве сопровождается уменьшением пористости [12–17]. Несколько сложнее данная зависимость проявляется при рассмотрении особенностей соотношений вторичного галита и проницаемости. Здесь значительное влияние оказали процессы трещинообразования. Именно по этой причине фиксируются хорошие фильтрационные свойства пород, характеризующиеся существенным их засолонением.

Более того, интенсивность данного процесса может быть существенной (рис. 2), что в ряде случаев определяет полное заполнение солью пустотного пространства, создающее благоприятные условия для образования локальных литологических барьеров, а следовательно, и ловушек неантиклинального типа. В качестве примера, иллюстрирующего данное положение, выступает северная граница залежи Тымпучиканского месторождения, приуроченной к талахскому горизонту. Керн из рассматриваемого стратиграфического диапазона, поднятого в скважине 254-1 представлен песчано-алевролитовыми отложениями, поры которых полностью залечены кристаллами галита.

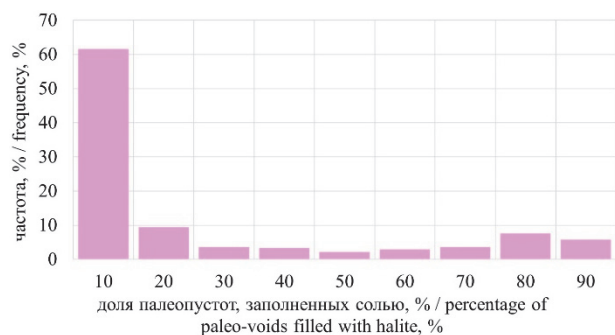


Рис. 2. Гистограмма засолоненности палеопустот продуктивных пород Непско-Ботубинской антеклизы
Figure 2. Histogram of salinity of productive rocks paleovoids of the Nepsko-Botuobinskaya antecline

Присутствие в продуктивных породах эпигенетического галита оказывает определенное влияние на характер разработки залежей углеводородов. В случае закачки в пласт воды при поддержании пластового давления, что для данной территории является актуальным, будет происходить растворение каменной соли, которое, в свою очередь, определит увеличение температуры. С одной стороны, это приведет к улучшению упругих свойств пласта, с другой – будет способствовать выпадению в осадок кристаллов карбонатных минералов, которые характеризуются ретроградной растворимостью (растворимость уменьшается по мере прогрева раствора). Это, безусловно, негативно повлияет на коллекторские свойства нефтегазоносных пластов. Также данное положение следует учитывать при осуществлении процессов гидроразрыва в карбонатных нефтегазоносных горизонтах. Присутствие воды в закачиваемых растворах приведет к растворению эпигенетической соли и осаждению карбонатных минералов на стенках пустот. Наиболее вероятно, что последствием этого явление станет частичная или полная изоляция от системы вновь образованных с помощью данного способа воздействия на пласт трещин [12; 15].

Также возможны осложнения строения коллекторов при проведении соляно-кислотной обработки призабойной зоны. Присутствие в поровых водах дополнительного количества ионов хлора увеличит произведение растворимости хлора и натрия, определив тем самым нарушение равновесия раствора и последующее техногенное осаждение кристаллов галита в пустотном пространстве, ухудшая фильтрационно-емкостные свойства целевых отложений.

Анализ материалов исследований керна [12] позволяет проследить общую тенденцию снижения интенсивности развития данных преобразований вниз по разрезу (таблица). Это можно рассматривать в качестве косвенного подтверждения существования тенденции проникновения рассолов поваренной соли из верхних слоев. Возможно, это происходило во время накопления хемогенных отложений в кембрийский период, когда существовал палеобассейн, воды которого имели аномально высокую соленость.

В данном случае заслуживает внимания приуроченность зон с повышенным содержанием эпигенетического галита к дизъюнктивным нарушениям [18–20]. По всей видимости, в местах их

развития в ряде случаев формировались системы трещин, по которым могли перемещаться соответствующие рассолы. Данное положение может быть использовано при проведении поисковых работ с целью выявления неантиклинальных лову-

шек углеводородов. Также его необходимо учитывать при составлении проектной документации разработки залежей нефти и газа. В первую очередь при оптимизации процессов поддержания пластового давления.

Оценка сокращения пористости пород в результате эпигенетического осадения галита в палеопустотном пространстве месторождений Непско-Ботубинской антеклизы

Горизонт	Абсолютное уменьшение пористости за счет вторичного осадения галита, д. ед.			Относительное уменьшение пористости за счет вторичного осадения галита, %		
	Минимальное	Максимальное	Среднее	Минимальное	Максимальное	Среднее
Осинский	0,002	0,225	0,054	2,6	96,7	54,3
Юряхский	0,004	0,267	0,08	9,9	99,3	68,7
Преображенский	0,004	0,039	0,014	3,4	97,3	24,0
Хамакинский	0,009	0,16	0,030	0,18	87,4	35,3
Ботубинский	0,003	0,019	0,012	0,18	89,1	17,3
Талахский	0,001	0,174	0,011	0,3	67,1	14,4

Assessment of the reduction of rocks porosity as a result of epigenetic deposition of halite in the paleovoid space of the deposits of the Nepsko-Botuobinskaya anticline

Horizon	Absolute reduction of porosity due to secondary precipitation of halite, d. q.			Relative reduction of porosity due to secondary precipitation of halite, %		
	Min	Max	Median	Min	Max	Median
Osinskii	0,002	0,225	0,054	2,6	96,7	54,3
Yuryakhskii	0,004	0,267	0,08	9,9	99,3	68,7
Preobrazhenskii	0,004	0,039	0,014	3,4	97,3	24,0
Khamakinskii	0,009	0,16	0,030	0,18	87,4	35,3
Botuobinskii	0,003	0,019	0,012	0,18	89,1	17,3
Talakhskii	0,001	0,174	0,011	0,3	67,1	14,4

Заключение

Засолонение пород-коллекторов имеет эпигенетический характер. Породы, имеющие высокие фильтрационно-емкостные свойства, наиболее заполнены NaCl; также отмечается приуроченность зон галитизации к вертикальным трещинам в породах.

Наблюдается тенденция снижения содержания галита вниз по разрезу в связи с миграцией из вышележающих сульфатно-галогенно-карбонатных толщ.

Галитизация пустотного пространства имеет отрицательное влияние на коллекторские свойства пород и продуктивность скважин.

Вероятны осложнения при методах разработки: закачивание в пласт воды, соляно-кислотная обработка призабойной зоны.

Список литературы

1. Страхов П.Н., Филиппов В.П., Мазанова А.В., Фадеев И.Ю. Проблемы освоения залежей углеводородов, приуроченных к коллекторам сложного строения // Нефтяное хозяйство. 2015. № 12. С. 98–101.
2. Лобусев А.В., Страхов П.Н., Лобусев М.А., Антипова Ю.А., Осин Д.А. Возможность использования данных сейсморазведки для прогнозирования коллекторских свойств продуктивных отложений Тымпучиканского месторождения // Территория нефтегаз. 2014. № 3. С. 18–23.
3. Кузнецов В.Г., Илюхин Л.Н., Постникова О.В., Бакина В.В., Горина А.Б., Дмитриевский С.А., Скобелева Н.М., Тихомирова Г.И., Сухы В., Фоммичева Л.Н. Древние карбонатные толщи Восточной Сибири и их нефтегазоносность. М.: Научный мир, 2000. 104 с.
4. Кушмар И.А., Григоренко Ю.Н., Ананьев В.В., Белинкин В.А. Нефть и газ Восточной Сибири. СПб.: Недра, 2006. 102 с.

5. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (стратиграфия, история развития). Новосибирск: СО РАН, 2009. 148 с.

6. Нигаматов Ш.А., Исмагилова Л.Р., Боценко А.Н. Прогнозирование зон засоления песчаников ботубинского горизонта на примере Чаюдинского месторождения (Восточная Сибирь) // *PRОнефть. Профессионально о нефти*. 2019. № 3 (13). С. 35–40. <https://doi.org/10.24887/2587-7399-2019-3-35-40>

7. Рыжов А.Е., Перунова Т.А., Орлов Д.М. Структура порового пространства пород-коллекторов ботубинского горизонта Чаюдинского месторождения // Научно-технический сборник Вести газовой науки. 2011. № 1 (6). С. 162–174.

8. Шемин Г.Г. Геология и перспективы нефтегазоносности венда и нижнего кембрия центральных районов Сибирской платформы (Непско-Ботубинская, Байкитская антеклизы и Катангская седловина). Новосибирск: СО РАН, 2007. 530 с.

9. Пономаренко А.С. Геология залежей карбонатных коллекторов Непско-Ботубинской антеклизы // *Вестник Евразийской науки*. 2020. № 6. С. 14.

10. Пономаренко А.С. Геология залежей углеводородов, приуроченных к терригенным коллекторам Непско-Ботубинской нефтегазоносной области // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2021. № 1. С. 3–10.

11. Пономаренко А.С. Особенности строения пустотного пространства ботубинского горизонта // *Вестник Евразийской науки*. 2021. № 5. С. 9.

12. Страхов П.Н., Колосков В.Н., Богданов О.А., Сапожников А.Б., Мазанова А.В. Освоение залежей углеводородов Непско-Ботубинской антеклизы // *Вестник Ассоциации буровых подрядчиков*. 2017. № 3. С. 39–43.

13. Мухидинов Ш.В., Воробьев В.С. Методические особенности петрофизического изучения засоленных терригенных пород нефтегазовых месторождений Чонской группы // *PRОнефть. Профессионально о нефти*. 2017. № 1 (3). С. 32–37.

14. Воробьев В.С., Жуковская Е.А., Мухидинов Ш.В. Учет эффекта засоления пород коллекторов пластов В10, В13 непской свиты для повышения эффективности поисково-разведочного бурения на Игнялинском, Тымпучиканском и Вакунайском лицензионных участках (Восточная Сибирь) // *Геология нефти и газа*. 2017. № 6. С. 49–57.

15. Воробьев В.С., Клиновая Я.С. Причины засоления терригенных пород в пределах Верхнечонского месторождения (Восточная Сибирь) // *Газовая промышленность*. 2017. № 4 (751). С. 36–43.

16. Воробьев В.С., Чеканов И.В., Клиновая Я.С. Модель распространения терригенных коллекторов и засоленных песчано-гравелитистых отложений в пределах месторождений центральной части Непско-го свода // *Геология нефти и газа*. 2017. № 3. С. 47–60.

17. Страхов П.Н., Колосков В.Н., Богданов О.А., Сапожников А.Б. Исследование неоднородностей нефтегазоносных отложений, М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2018. 189 с.

18. Рапацкая Л.А. О роли шарьяжно-надвиговой тектоники в формировании месторождений углеводородов на юге Сибирской платформы // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2014. № 10. С. 102–109.

19. Рапацкая Л.А. Многофакторная и разнополярная роль дизъюнктивной тектоники в онтогенезе углеводородов (Сибирская платформа) // *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*. 2016. № 2 (55). С. 40–50. <https://doi.org/10.21285/0301-108X-2016-55-2-40-50>

20. Ивченко О.В., Поляков Е.Е., Ивченко М.В. Влияние разрывной тектоники на нефтегазоносность вендско-нижнекембрийских отложений южных районов Сибирской платформы (Непско-Ботубинская антеклиза и сопредельные территории) // *Научно-технический сборник Вести газовой науки*. 2016. № 6. С. 40–62.

References

1. Strakhov PN, Filippov VP, Mazanova AV, Fadeev IYu. Problems of development of hydrocarbon deposits confined to reservoirs of complex structure. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2015;(12):98–101. (In Russ.)

2. Lobusev AV, Strakhov PN, Lobusev MA, Antipova YuA, Osin DA. Possible use seismic data for predicting reservoir properties deposits of Tympuchikansky field. *Territorija Neftegas*. 2014;(3):18–23. (In Russ.)

3. Kuznetsov VG, Ilyukhin LN, Postnikova OV, Bakina VV, Gorina AB, Dmitrievskii SA, Skobeleva NM, Tikhomirova GI, Sukhy V, Fomicheva LN. *Ancient carbonate series of eastern Siberia and their oil-and-gas-bearing*. Moscow: Nauchnyi Mir; 2000. (In Russ.)

4. Kushmar IA, Grigorenko YuN, Ananov VV, Belinkin VA. *Oil and gas of Eastern Siberia*. St. Petersburg: Nedra Publ.; 2006. (In Russ.)

5. Melnikov NV. *The Vendian-Cambrian salt basin of the Siberian platform (stratigraphy, history of development)*. Novosibirsk: SB RAS; 2009. (In Russ.)

6. Nigmatov ShA, Ismagilova LR, Boshchenko AN. The prediction of salted zones of Botubinskiy formation sandstone on the example of Chayandinsky field (East Siberia). *PROneft. Professionally about Oil*. 2019;(3):35–40. (In Russ.)

7. Ryzhov AE, Perunova TA, Orlov DM. Structure of the pore space of reservoir rocks of the Botubinsky horizon of the Chayandinsky deposit. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2011;(1):162–174. (In Russ.)

8. Shemin GG. *Geology and petroleum potential of Vendian and Lower Cambrian deposits in central areas of the Siberian platform*. Novosibirsk: SB RAS; 2007. (In Russ.)
9. Ponomarenko AS. Geology of deposits of carbonate reservoirs of the Nepsko-Botuobinskaya anticline. *The Eurasian Scientific Journal*. 2020;(6):14. (In Russ.)
10. Ponomarenko AS. Geology of hydrocarbon deposits confined to terrigenous reservoirs of the Nepsko-Botuobinsk oil and gas region. *Science and Technology in the Gas Industry*. 2021;(1):3–10. (In Russ.)
11. Ponomarenko AS. Structure features of the voids of the Botuobin horizon. *The Eurasian Scientific Journal*. 2021;(5):9. (In Russ.)
12. Strakhov PN, Koloskov VN, Bogdanov OA, Sapozhnikov AB, Mazanova AV. Development of hydrocarbon deposits of the Nepsko-Botuobinskaya anticline. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*. 2017;(3):39–43. (In Russ.)
13. Mukhidinov SV, Vorobyev VS. Methodical features of petrophysical study salinization clastic rocks of oil and gas fields Chong Group. *PROneft. Professionally about Oil*. 2017;(1):32–37. (In Russ.)
14. Vorobev VS, Zhukovskaya EA, Mukhidinov ShV. Consideration of the salinization effect of reservoir rocks layers B10, B13 of the Nepa formation in order to improve the exploration drilling efficiently at the Ignyalinskiy, Tym-puchikanskiy and Vakunayskiy license areas (Eastern Siberia). *Oil and Gas Geology*. 2017;(6):49–57. (In Russ.)
15. Vorobev VS, Klinovaya YaS. Causes of salinization of terrigenous rock within the Verkhnechonskoe field (Eastern Siberia). *Gas Industry Journal*. 2017;(4):36–43. (In Russ.)
16. Vorobev VS, Chekanov IV, Klinovaya YaS. The distribution model of terrigenous reservoirs and saline sand-gravelite deposits within the fields of the central part of the Nepal arch. *Oil and Gas Geology*. 2017;3:47–60. (In Russ.)
17. Strakhov PN, Koloskov VN, Bogdanov OA, Sapozhnikov AB. *Research of Nonuniformity of Oil and Gas Deposits*. Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas Center; 2018. (In Russ.)
18. Rapatskaya LA. To the role of overthrust-fold tectonics in hydrocarbon deposits formation on the south of Siberian platform. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;(10):102–109. (In Russ.)
19. Rapatskaya LA. Multifactorial and bipolar role of disjunctive tectonics in hydrocarbon ontogeny (Siberian platform). *Proceedings of Siberian Department of the Section of Earth Sciences of Russian Academy of Natural Sciences*. 2016;(2):40–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/0301-108X-2016-55-2-40-50>
20. Ivchenko OV, Polyakov EE, Ivchenko MV. Influence of fault tectonics on the oil-and-gas-bearing capacity of Vendian-Lower-Cambrian deposits at the southern regions of the Siberian platform (Nepa-Botuoba anticline and contiguous territories). *Vesti Gazovoy Nauki*. 2016;(6):40–62. (In Russ.)

Сведения об авторах

Страхов Павел Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-9990-4514, eLIBRARY SPIN-код: 4821-8375; pavel.n.strakhov@mail.ru

Пonomarenko Анастасия Сергеевна, аспирант, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-9641-8166; anast.ponomarenko@gmail.com

About the authors

Pavel N. Strakhov, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9990-4514, eLIBRARY SPIN-code: 4821-8375; pavel.n.strakhov@mail.ru







Anastasia S. Ponomarenko, graduate student, Department of Mineral Developing and Oil & Gas, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9641-8166; anast.ponomarenko@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-343-354
УДК 551.763.3


Научная статья / Research article

Изучение вулканогенно-осадочных пород дзыхринской толщи в пределах абхазской зоны Гагрско-Джавского поднятия Северо-Западного Кавказа

Е.В. Карелина^a , И.С. Мотузов^a , В.Е. Марков^a ,
Ю.Н. Панасенко^b , Н.В. Жорж^a , О.В. Носаева^a 

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bЦентральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов,
Москва, Российская Федерация

 karelina-ev@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 августа 2022 г.

Доработана: 22 ноября 2022 г.

Принята к публикации: 27 ноября 2022 г.

Ключевые слова:

верхний мел, Хостинский район, каньон
Белые Скалы, Туапсинский прогиб

Аннотация. Рассмотрены результаты изучения вещественного состава вулканогенно-осадочных пород дзыхринской толщи, выходящих на дневную поверхность в верхнем течении р. Большая Хоста (Хостинский район, Краснодарский край). В породах мелового возраста ахунской серии, сложенной известняками дзыхринской толщи и казачебродской свиты, обнаружен выход обломочных пород. Детально изучены строение и минеральный состав пробы толщи, а также ее химический состав по данным рентгенофлуоресцентного анализа. В толще выделено два слоя: нижний (3 м) кремво-коричневого цвета и верхний (0,05 м) – зеленый. Макроскопически она представляет собой песчаники линзовидно-слоистые, мелкозернистые, литокристаллокластические, полимиктовые, с карбонатным цементом. Подстилают толщу переслаивающиеся темно-серые известняки и черные алевролиты агурской свиты нижнего мела, а перекрывают – кремво-известняки с прослоями коричневых кремной казачебродской свиты верхнего мела. Данные микроскопических исследований, а также рентгенофлуоресцентного анализа позволили установить в составе песчаников следующие минералы: кварц, калиево-полевой шпат и плагиоклаз, реже амфибол, а также большое количество карбонатного вещества, и сделать вывод, что по составу они соответствуют туфам среднего состава (андезидацитам).

Благодарности







Выражаем благодарность Полине Никодимовне Лейбгам, инженеру первой категории, за помощь при описании шлифов, Виктору Васильевичу Дьяконову за обсуждение идей и консультации в области вулканизма, Юрию Андреевичу Баксакову за помощь в изготовлении шлифов, а также Андрею Валерьевичу Федорову за выполнение РФ-анализов.

Для цитирования

Карелина Е.В., Мотузов И.С., Марков В.Е., Панасенко Ю.Н., Жорж Н.В., Носаева О.В. Изучение вулканогенно-осадочных пород дзыхринской толщи в пределах абхазской зоны Гагрско-Джавского поднятия Северо-Западного Кавказа // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 343–354. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-343-354>




The study of volcanic-sedimentary rocks of the Dzykhra sequence within the Abkhazian zone of the Gagra-Java uplift, Northwestern Caucasus

Elena V. Karelina^a , Ivan S. Motuzov^a , Vladimir E. Markov^a ,
Yuri N. Panasenko^b , Natalya V. Zhorzh^a , Olga V. Nosaeva^a 

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

^bCentral Geological Research Institute for Nonferrous and Precious Metals, Moscow, Russian Federation

 karelina-ev@rudn.ru

Article history

Received: August 17, 2022

Revised: November 22, 2022

Accepted: November 27, 2022

Keywords:

upper Cretaceous, Khosta district, White Rocks Canyon, Tuapse trough

Abstract. The authors discuss the results of studying the composition of the volcanogenic-sedimentary rocks of the Dzykhra sequence, which come to the surface in the upper reaches of the river Bolshaya Khosta (Khostinsky district, Krasnodar territory). In the rocks of the Cretaceous age of the Akhun series, composed of limestones of the Dzykhra sequence and the Kazachy Brod suite, an outcrop of clastic rocks was found. The structure and mineral composition of the rock sample, as well as its chemical composition according to X-ray fluorescence analysis, were studied in detail. In the sequence, two layers are distinguished: the lower (3 m) cream-brown and the upper (0.05 m) green. Macroscopically, it is a lenticular-layered, fine-grained, lithocrystal-clastic, polymictic sandstone with carbonate cement. The sequence is underlain by interbedded dark gray limestones and black siltstones of the Lower Cretaceous Agur Formation, and overlain by cream limestones with interlayers of brown cherts of the Upper Cretaceous Kazachy Brod Formation. The data of microscopic studies, as well as X-ray fluorescence analysis, made it possible to establish the following minerals in the composition of sandstones: quartz, potassium-feldspar and plagioclase, less often amphibole, as well as a large amount of carbonate matter, and to conclude that in composition they correspond to tuffs of medium composition (andesite-dacite).

Acknowledgements

We would like to express our gratitude to Polina N. Leibgam, engineer of the first category, for help in describing thin sections, Viktor V. Dyakonov for discussion of ideas and consultations in the field of volcanism, Yury A. Baksakov for help in preparing thin sections, and Andrey V. Fedorov for XRF analysis.

For citation

Karelina EV, Motuzov IS, Markov VE, Panasenko YuN, Zhorzh NV, Nosaeva OV. The study of volcanic-sedimentary rocks of the Dzykhra sequence within the Abkhazian zone of the Gagra-Java uplift, Northwestern Caucasus. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):343–354. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-343-354>

Введение

Цели исследования – уточнение геологического строения дзыхринской толщи и актуализация стратиграфического разреза юрских отложений. Объект изучения находится в Хостинском районе Краснодарского края. В геоморфологическом и тектоническом отношении район исследований расположен в пределах размытой части ядра Галицинской (Ахштырской) антиклинали (рис. 1).

В геологическом строении района принимают участие карбонатно-терригенные породы поздне-мелового и палеогенового возраста. Породы мелового возраста слагают преимущественно ядра

антиклиналей (рис. 2). В основании разреза породы, относящиеся к ахунской серии ($K_{1-2ag+dz}$), объединяющей агурскую свиту и дзыхринскую толщу. Агурская свита представлена переслаиванием серых микрозернистых и черных пелитоморфных известняков видимой мощностью более 80 м. Венчает разрез дзыхринская толща, сложенная туфопесчаниками коричневого и зеленого цветов (мощностью 1,5–50 м), на которых, в свою очередь, согласно залегают известняки казачебродской свиты (K_2kzb), слоистые, содержащие горизонты с кремнями. Известняки трансгрессивно перекрываются мергелями палеогенового возраста.

Исследуемый район выхода на дневную поверхность отложений верхнего мела уже фиксировался предыдущими исследованиями [1; 2], однако в материалах данных работ отсутствует единое мнение по вопросу обособления дзыхринской толщи от выше- и нижележащих пород. В более ранних работах она завершает разрез объединенной ахунской серии, позже ее поместили в подошву. Так, согласно объяснитель-

ной записке к геологической карте Лист К-37 (Сочи), К-38 (Махачкала), К-39 М 1:1 000 000 (третье поколение, 2011 г.) [2], ахунская серия (K₂ah) объединяет дзыхринскую толщу и казачебродскую свиту. Возраст ахунской серии сеноман-маастрихтский, подтвержден находками фауны. Казачебродская свита согласно залегает на дзыхринской толще. Общая мощность серии 240–350 м.

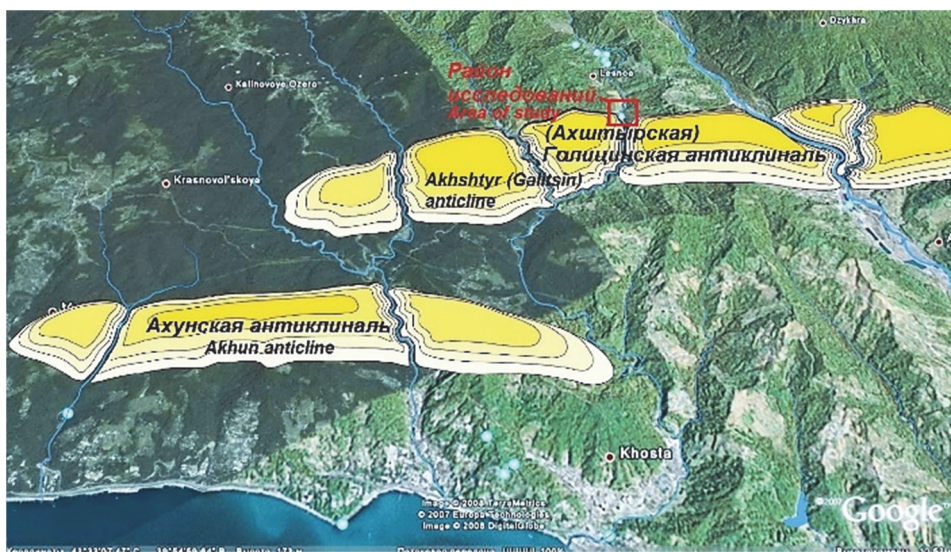


Рис. 1. Схема Галицинского (Ахштырского) и Ахунского антиклинальных хребтов в Адлерском морфоструктурном подрайоне [3] (красным квадратом обозначен район исследований)
Figure 1. Scheme of the Galitsinsky (Akhshtyrsky) and Akhunsky anticle ridges in the Adler morphostructural subarea [3] (the area of study is marked with a red square)

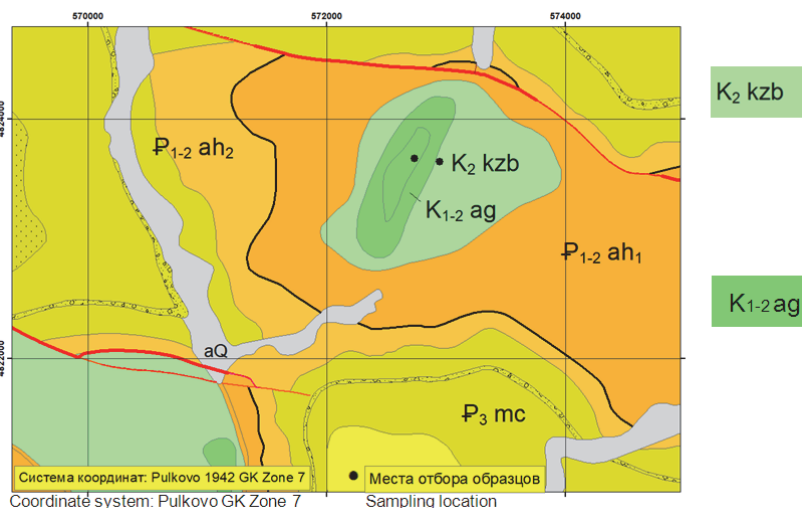


Рис. 2. Геологическая карта М 1: 200 000 [4]:
 K₁₋₂ag+dz – Агурская свита пестроцветная карбонатная и дзыхринская толща объединенные: известняки, мергели пестроцветные, туфопесчаники (до 230 м); K₂kzb – Казачебродская свита: известняки слоистые с включениями кремней, в подошве пестроцветные известняки с прослоями мергелей – 30–35 м, в кровле известняки светлые без кремней – 80–115 м (210–300 м)
Figure 2. Geological map M 1: 200,000 [4]:
 K₁₋₂ag+dz – Agur suite is a variegated carbonate and the Dzykhra sequence combined: limestones, variegated marls, tuff sandstones (up to 230 m); K₂kzb – Kazachy Brod suite: layered limestone with chert inclusions, at the bottom, variegated limestones with interlayers of marls – 30–35 m, at the top, light limestones without flints – 80–115 m (210–300 m)

В то же время из объяснительной записки к геологической карте Лист К-37 (Сочи), К-38 (Махачкала), К-39 М 1: 200 000 (второе поколение, 2000 г.) [4] следует, что в ахунскую серию объединены агурская свита и дзыхринская толщи ($K_{1-2}ag+dz$), причем агурская свита находится в основании разреза, а дзыхринская толща венчает объединенный разрез. Возраст объединенной толщи баррем-сеноманский (также подтвержден фауной). Казачебродская свита (K_2kzb) согласно залегает на туфопесчаниках дзыхринской толщи и трансгрессивно перекрывается мергелями *ахитырской* свиты раннего палеозоя.

1. Материалы и методы

В ходе проведения геологической практики для студентов Российского университета дружбы народов летом 2020 г. на одном из маршрутов, примерно в 6 км на северо-восток от г. Хоста (рис. 4), в районе каньона Белые Скалы (Хостинский район, Краснодарский край) среди толщ меловых известняков в точке наблюдения 35 обнаружен выход пород зеленовато-серого цвета, представленных песчаниками (рис. 3, 4).



Рис. 3. Вид на Ахунскую и Галицинскую (Ахштырскую) антиклинали: красная стрелка указывает на местоположение каньона Белые Скалы
Источник: www.maps.google.com

Figure 3. View of the Akhunskaia and Golitsynskaya (Akhshyrskaya) anticlines: the red arrow indicates the location of the White Rocks Canyon
Source: www.maps.google.com

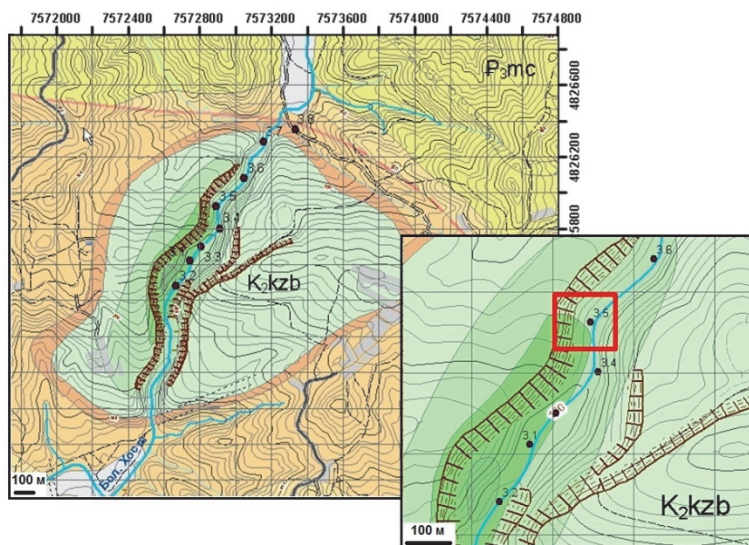


Рис. 4. Обзорная карта месторасположения района исследований: красный квадрат – точка выхода пород дзыхринской толщи (основа – геологическая карта России М 1: 200 000)

Figure 4. Overview map of the location of the study area: the red square is the outcrop point of the rocks of the Dzykhra sequence (based on the geological map of Russia M 1: 200,000)

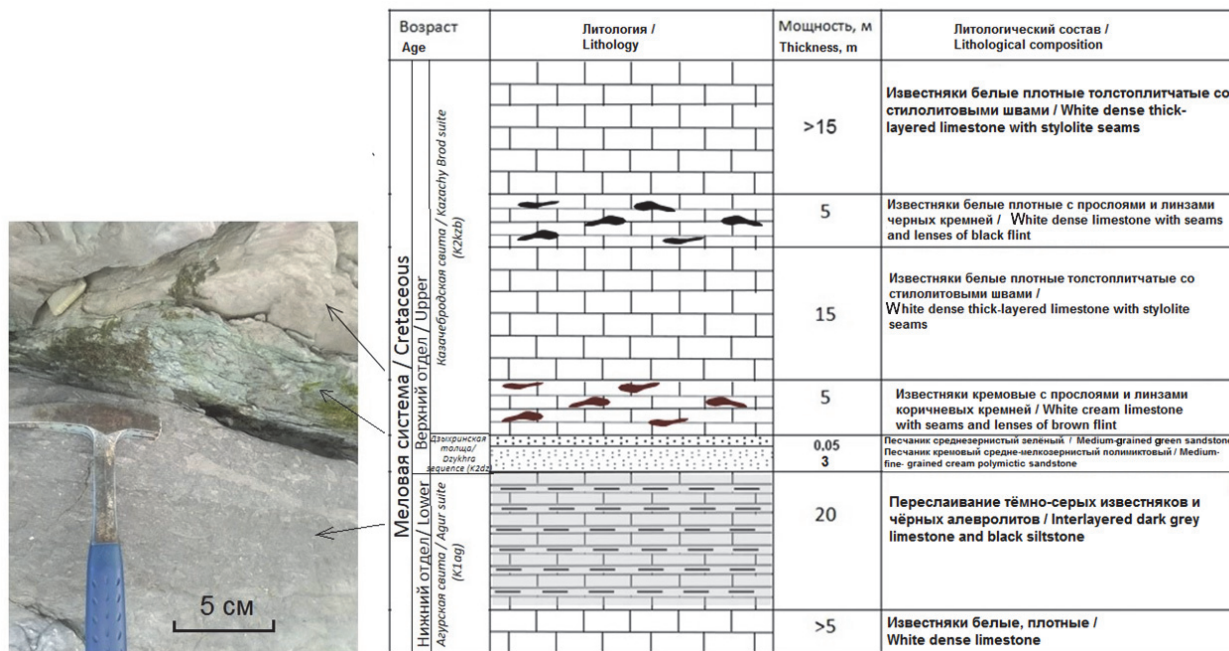


Рис. 5. Обнажение песчаников дзыхринской толщи (слева) и стратиграфическая колонка (составлено Е.В. Карелиной, 2021)
Figure 5. Sandstone outcrop of the Dzykhra sequence (left) and stratigraphic column (compiled by Elena V. Karelina, 2021)

Макроскопически в составе толщи песчаников выделяются два слоя – кремново-коричневый (мощностью 3 м) и зеленый, мощностью 5 см (рис. 5). Песчаники линзовидно-слоистые, мелкозернистые, полимиктовые, рыхлые, с карбонатным цементом. По своим характеристикам породы относятся к дзыхринской толщ.

Подстилающими породами являются переслаивающиеся темно-серые органогенные известняки и черные алевролиты агурской свиты нижнего мела. Перекрывают песчаники кремновые известняки с прослоями коричневых кремней казачебродской свиты верхнего мела.

Для выяснения особенностей их состава были отобраны и изучены образцы пород, из которых изготовлено пять шлифов для минералогического и литолого-петрографического анализа в лабораторных условиях. Также из образца данной горной породы отобрано шесть проб, по которым выполнен рентгенофлуорисцентный анализ.

Микроскопический анализ туфопесчаников дзыхринской толщи

При изучении шлифов из отобранных образцов выяснено, что породы вулканогенно-осадоч-

ной дзыхринской толщи представляют собой литокристаллокластический туф среднего состава (рис. 6–11).

Как показали исследования, породы характеризуются микрослоистыми текстурами и литокластическими структурами. Размер зерен – менее 0,3 мм, что соответствует алевроит-псаммитовой размерности. Основными минералами в обломках являются плагиоклаз, иногда карбонатизированный (рис. 10), и обыкновенная роговая обманка. Также встречаются литокласты с пилотакситовой (рис. 8) и фельзитовой (рис. 11) структурой. Среди обломков обнаруживаются сферолиты карбоната (рис. 11). Основная масса (цемент) подверглась интенсивным вторичным изменениям (хлоритизация, карбонатизация) (рис. 7, 9).

На рис. 6–11 приведены снимки и краткое описание шлифов без анализатора и с анализатором.

Таким образом, исходя из приведенных данных, порода определена как туф среднего состава (дациандезит) алевроит-псаммитовой размерности (туфопесчаник и туфоалевролит).

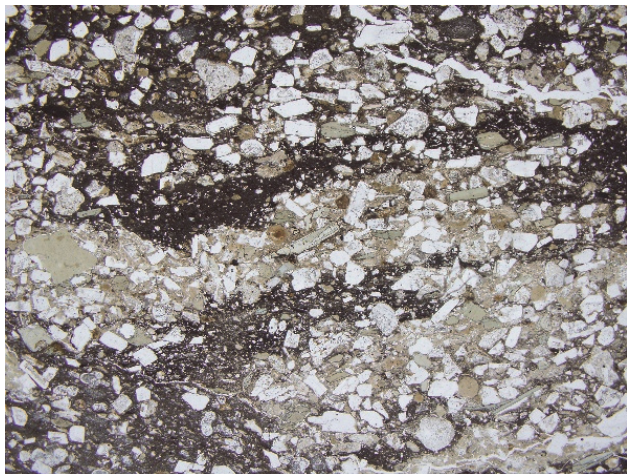


Рис. 6. Шлиф С 04-4 (ув. $\times 2.5$).

Литокристаллокластический туф среднего состава (дациандезит) алеврит-псаммитовой размерности (без анализатора). Прерывисто-полосчатая текстура литокристаллокластического туфа.

Неравномерно распределенные кристаллокласты зонального плагиоклаза и обыкновенной роговой обманки на фоне основной массы породы.

Ширина поля зрения 7 мм

Figure 6. Thin section C 04-4 (magnification $\times 2.5$).

Lithocrystal-clastic tuff of medium composition (dacryandesite) of silty-psammitic dimension (without analyzer).

Discontinuously banded texture of lithocrystal clastic tuff.

Unevenly distributed crystal clasts of zonal plagioclase and common hornblende against the background of the rock mass.

The width of the field of view is 7 mm

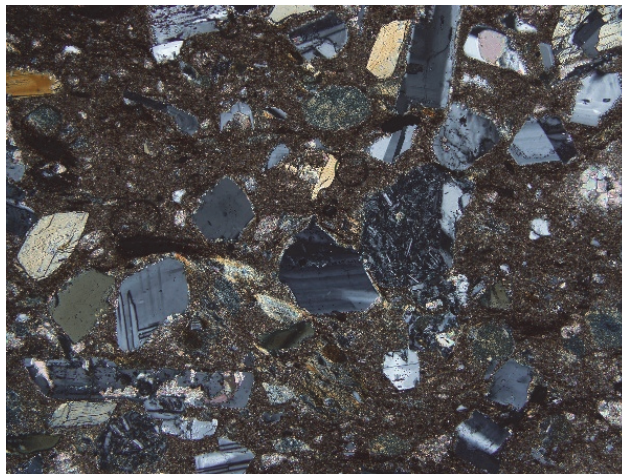


Рис. 7. Шлиф С 04-4 (увеличение $\times 10$).

Литокласты эффузивов и кристаллокласты плагиоклаза и обыкновенной роговой обманки в измененной основной массе (с анализатором).

Ширина поля зрения 1,75 мм

Figure 7. Thin section C 04-4 (magnification $\times 10$).

Lithoclasts of effusives and crystal clasts of plagioclase and common hornblende in the altered groundmass (with analyzer).

Field of view width 1.75 mm

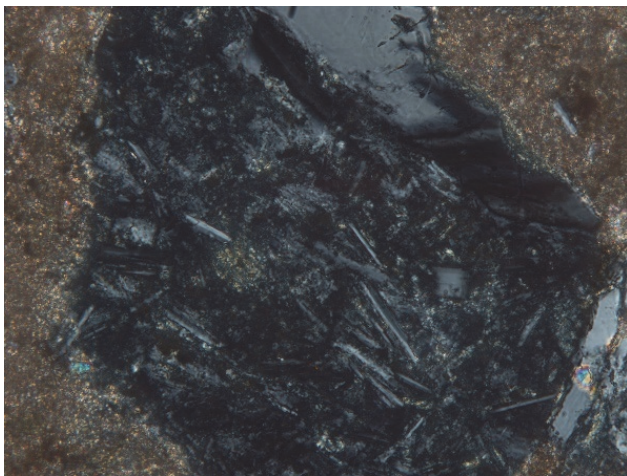


Рис. 8. Шлиф С 04-4 (увеличение $\times 50$).

Литокласт пилотакситовой основной массы эффузива (с анализатором).

Ширина поля зрения 0,35 мм

Figure 8. Thin section C 04-4 (magnification $\times 50$).

Lithoclast of pilotaxitic effusive groundmass (with analyzer).

The width of the field of view is 0.35 mm

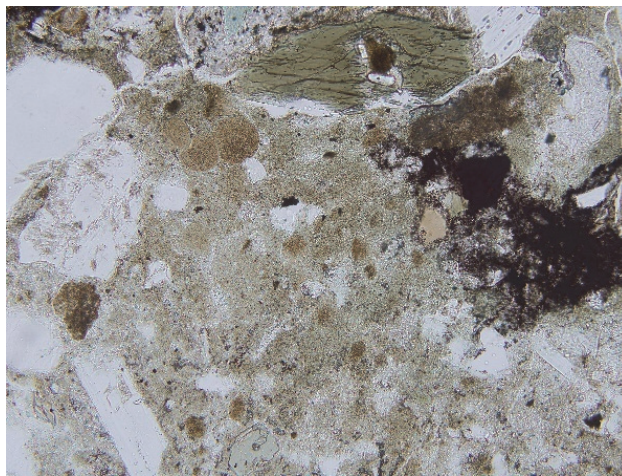


Рис. 9. Шлиф С 04-1 (увеличение $\times 20$).

Литокристаллокластический туф среднего состава (дациандезит) алеврит-псаммитовой размерности. Замещенная хлоритом (\pm гидрослюда) основная масса туфа (без анализатора).

Ширина поля зрения 0,88 мм

Figure 9. Thin section C 04-1 (magnification $\times 20$).

Lithocrystal-clastic tuff of medium composition (dacryandesite) of silty-psammitic dimension (without analyzer).

The groundmass of tuff replaced by chlorite (\pm hydromica).

The width of the field of view is 0.88 mm

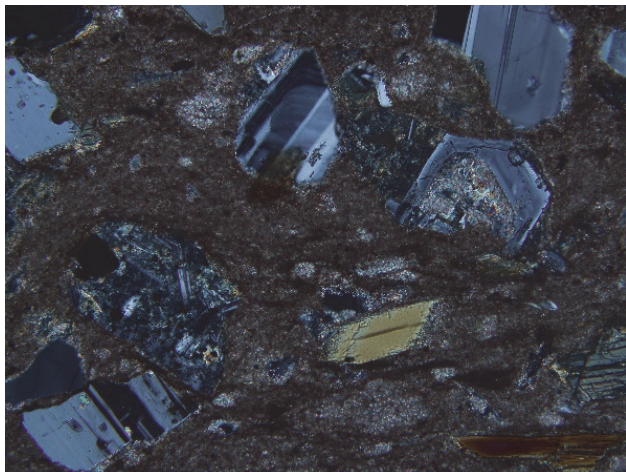


Рис. 10. Шлиф С 04-2 (увеличение ×20).

Литокласт пилотакситовой основной массы эффузива и кристаллокласты обыкновенной роговой обманки и зонального плагиоклаза (с анализатором). Псевдоморфозы карбоната по плагиоклазу. Ширина поля зрения 0,88 мм

Figure 10. Tin section C 04-2 (magnification ×20).

Lithoclast of pilotaxitic effusive groundmass and crystal clasts of common hornblende and zoned plagioclase (with analyzer). Pseudomorphoses of carbonate after plagioclase. The width of the field of view is 0.88 mm

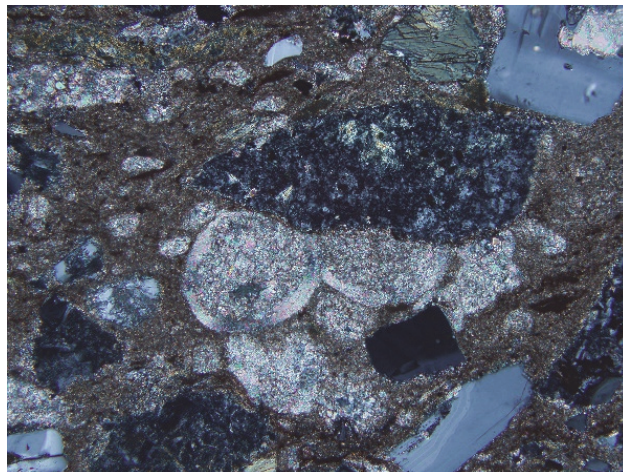


Рис. 11. Шлиф С 04-2.1 (увеличение ×20).

Литокласт фельзитовой основной массы эффузива и кристаллокласты обыкновенной роговой обманки и зонального плагиоклаза. Сферообразные выделения карбоната. Ширина поля зрения 0,88мм

Figure 11. Thin section C 04-2.1 (magnification ×20).

Lithoclast of the felsic groundmass of the effusive and crystal clasts of common hornblende and zoned plagioclase. Spherical segregations of carbonate. The width of the field of view is 0.88 mm

Изучение химического состава туфопесчаников дзыхринской толщи

Для определения химического состава, а также уточнения минерального состава из изучаемых пород были отобраны две пробы: пр-1 –

зеленые туфопесчаники; пр-2 – туфопесчаники кремового цвета (рис. 12).

Как видно из рис. 12 и 13, в обоих образцах присутствует кварц, ПШ и плагиоклаз, а также амфибол (роговая обманка) (первая линия ~8,4 Å) (рис. 13).

	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Rb	Sr	Y
ПР-1	1,13	5,45	0,55	3,45	0,0047	0,0037	0,108	0,0074
	K	Ca	Ti	Fe	Zn	Rb	Sr	Y
ПР-2	<0,24	18,9	0,41	1,73	0,0030	0,0024	0,0559	0,0029

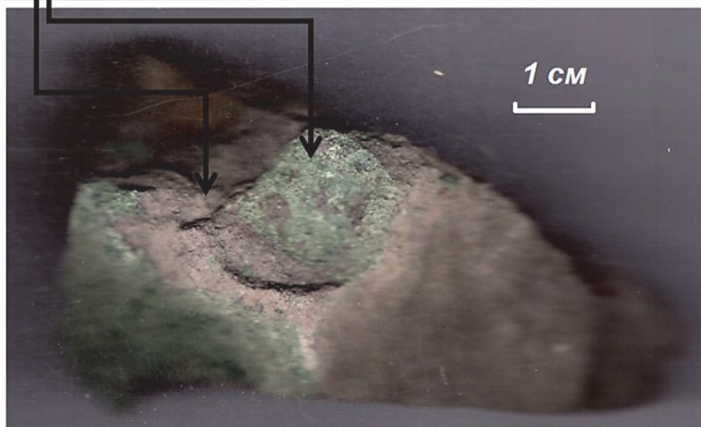


Рис. 12. Химический состав отобранных образцов (в весовых процентах) по данным рентгенофазового анализа
Figure 12. The chemical composition of the selected samples (in weight percent) according to X-ray phase analysis

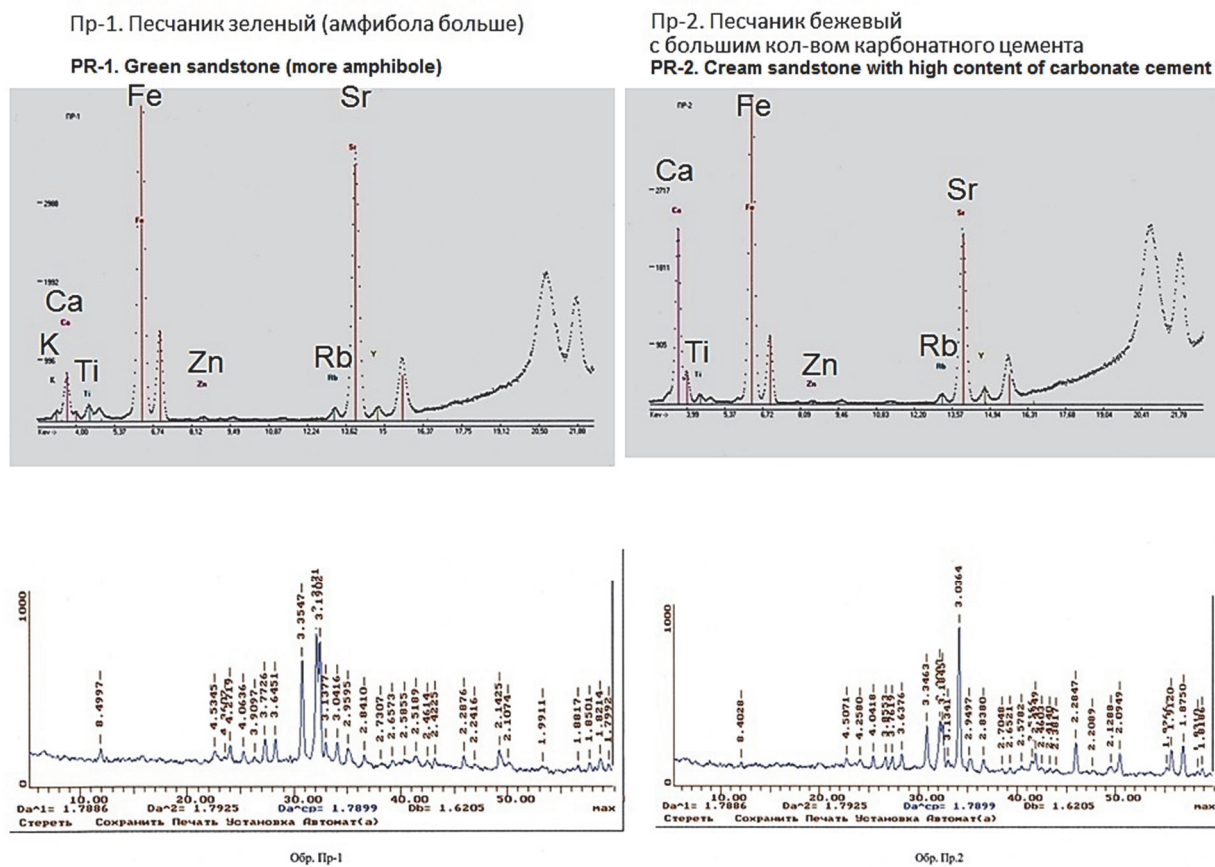


Рис. 13. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) проб пр-1 и пр-2
Figure 13. Results of X-ray fluorescence analysis (XRF) of pr-1 and pr-2 samples

Песчаники из обоих слоев, несмотря на сходный минеральный состав, все же отличаются друг от друга не только по цвету, но и по химическому составу. Так, зеленые песчаники характеризуются повышенным содержанием Fe, Zn, а также редких элементов Rb, Sr и Y и значительными содержаниями K. Однако, содержания Ca в них в 3,5 раза ниже, чем в кремневых песчаниках. Возможно, это говорит о преобладании в породе K-полевых шпатов над плагиоклазами. Второй образец (коричневые песчаники) характеризуется весьма значительным количеством кальция. Вероятно, это можно объяснить широким проявлением вторичных изменений, таких как псевдоморфозы кальцита по плагиоклазу, а также его присутствием в карбонатном цементе.

2. Результаты и обсуждение

В процессе сопоставления отложений дзырринской толщи Абхазской структурно-формационной зоны (СФЗ) установлено не только ее веще-

ственное, но и возрастное сходство с вулканогенно-осадочными породами свиты Паук, относящейся к Новороссийско-Лазаревской СФЗ, а также вулканогенно-терригенной толщии Восточной части Чвежипинской СФЗ [5]. Из объяснительной записки к геологической карте Лист К-37 (Сочи), К-38 (Махачкала), К-39 М 1: 200 000 (2-е поколение, 2000 г.) [4] следует, что:

«Свиты Паук, ананурская и керкетская объединенные (K_2pk+kk) распространены в Новороссийско-Лазаревской СФЗ, в междуречье Аше-Псезуапсе. Граница с подстилающими породами нижнего мела согласная. Свита Паук находится в основании и сложена субфлишевым переслаиванием туфопесчаников (3,0–5,0 м; 40 %), кварцевых песчаников (0,1–0,4 м; 10 %), аргиллитов черных, зеленоватых, буроватых (0,1–0,3 м; 20–25 %), мергелей глинистых (0,05–0,15 м; 20 %), редко кремневых известняков (0,05–0,1 м). Верхняя часть разреза (30 м) представлена тонкоритмичным чередованием (3–5 см) кварцевых песчаников (10 %), кремней (30 %) и аргиллитов (60 %).

Мощность свиты – 80 м... Сеноманский и ранне-туронский возраст этих свит обоснован микрофауной: *Gavelinella cenomanica* Brotz., *G. cuvillieri* Carb., *Gaudryinella turonica* Samysch., *Arenobulimina orbigny* Reuss и др.».

Как говорилось ранее, район исследований расположен в пределах Гагрско-Джавского складчато-глыбового поднятия, сложенного «...формациями островной дуги, ее склонов (туфы, лавы, терригенные породы средней юры) и островного шельфа (карбонатно-терригенные отложения верхней юры-эоцена)» [4]. В структуре поднятия выделяют четыре структурно-формационных зоны: Краснополянскую, Абхазо-Рачинскую, Ахцу и Абхазскую. В пределах изученной площади большая часть Гагрско-Джавского поднятия перекрыта Новороссийско-Лазаревским и Чвежипсинским аллохтонами.

Рассматриваемый район исследований относится к Абхазской структурно-формационной зоне в структуре Гагрско-Джавского складчато-глыбового поднятия. Абхазская СФЗ является промежуточной ступенью между зоной Ахцу и Адлерской депрессией в междуречье Сочи и Мзымты, протягиваясь в акваторию Черного моря до траверза г. Дагомыса. Состав оксфорд-эоценового комплекса отложений в пределах Абхазской СФЗ соответствует «терригенно-карбонатной мелководной формации островного шельфа (ШО J_3-P_2) мощностью 2,5 км, запечатанной почти 3 км олигоцен-миоценовой молассой остаточного морского бассейна (МО P_3-N_1)» [4]. В тектоническом отношении в Абхазской СФЗ развиты симметричные складки с углами падения крыльев 20–30°. Наиболее крупными пликвативными структурами являются Ахунская и Ахштырская антиклинали, их оси погружаются на запад в сторону Туапсинского прогиба под углами 7–10°. Северная граница зоны проводится по Монастырскому разлому и Воронцовскому надвигу, южная – по подошве палеоцен-четвертичной молассы.

Близлежащая Новороссийско-Лазаревская складчатая зона (СФЗ) образует полосу шириной более 20 км, которая постепенно сужается до 9 км в юго-восточном направлении, а в верхнем течении р. Сочи она уже полностью эродирована. Данная СФЗ сложена осадками флишевой терригенной и терригенно-карбонатной формаций келловей-маастрихтского возраста общей мощностью более 5,5 км. Эта формация маркирует условия задугового бассейна, или задугово-

го спрединга (ЗС J_3-P_2) [6]. Вулканические образования в составе осадков присутствуют лишь среди отложений свиты Паук (сеноман), в которой встречены туфы основного состава. Отложения Новороссийско-Лазаревской СФЗ залегают на вулканитах байоса Закавказской плиты, которые в Абхазской СФЗ непрерывно перекрываются карбонатными образованиями островного шельфа. Согласно выводам авторов [4], «в альпийский этап осадконакопления островная дуга и задуговой бассейн располагались на значительном расстоянии друг от друга, а следовательно, их совмещение в современной структуре, с большой долей вероятности, является тектоническим».

Согласно [6], к началу позднего мела относятся значительную активизацию магматических процессов в пределах рассматриваемого района, а также в его окрестностях: разнофациальные породы субщелочного габброидного комплекса (evK_2) фиксируются в бассейнах рек Псоу, Мзымта, Сочи, Лоо, Пшехи, Туапсе. По характеру взаимоотношений с вмещающими юрскими и раннемеловыми породами (глинистыми сланцами лейаса, вулканогенными породами байоса, сланцами и песчаниками бата и баррема-альба) установлено, что мелкие гипабиссальные и субвулканические тела имеют возраст «ранний сеноман – поздний турон» (K_2s-t). По составу габброиды сложены средним плагиоклазом, титан-авгитом и рудным минералом (магнетит). По химическому составу и структуре данные породы принято относить к гипабиссальным и жильным щелочным меланократовым породам типа безоливиновых тишенитов или эссексит-диабазов [6]. С данным типом габброидов связывают эруптивные брекчии типа трубок взрыва из верхних частей субвулканических штоков, а также сеноманские вулканиты. В более молодых слоях данный тип пород не встречен. Ранее нами уже рассматривался подобный тип интрузивных пород основного состава в соседней Абхазско-Рачинской СФЗ [7].

Подводя итог работы, можно отметить следующее: в результате проведенных исследований выхода дзыхринской вулканогенно-осадочной толщи около каньона Белые Скалы впервые показан литолого-геохимический состав данных отложений в указанном районе. Полученные данные в полной мере согласуются с информацией о региональном геологическом строении Абхазской СФЗ [3]. Дзыхринская толща Абхазской

СФЗ (автохтон) является одновозрастным аналогом свиты Паук (сеноман) Новороссийско-Лазаревской и Чвежипсинской СФЗ (аллохтоны). Принимая во внимание тот факт, что структуры Абхазской (автохтонной) СФЗ находят свое продолжение и в акваториальной части Черноморского осадочного бассейна (южная переклинали Туапсинского прогиба, вал Шатского) [8], детальное изучение вещественного состава сеноманских вулканогенно-осадочных отложений Северо-Западного Кавказа (дзыхринская толща, свита Паук) позволяет получить необходимую информацию

для использования данной толщи в качестве маркирующего горизонта при анализе кернового материала и стратификации разреза морских скважин.

Настоящая работа может быть использована при анализе геолого-геофизической информации при изучении глубоководных частей нижне- и верхнемеловых отложений [9], так как вышеуказанные СФЗ находят свое продолжение в акваториальной части Туапсинского прогиба (рис. 14), что, в свою очередь, открывает перспективы для продолжения поисковых работ на нефть и газ [10].

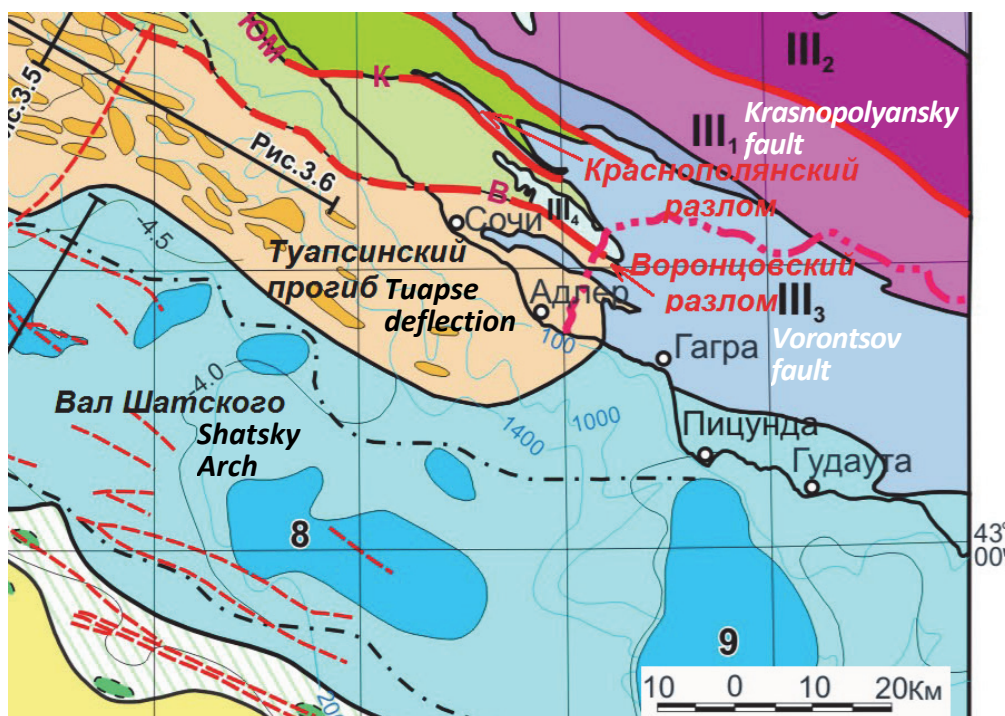


Рис. 14. Фрагмент карты структурно-тектонического районирования Восточно-Черноморского региона (составлена с использованием материалов [11; 12])

Figure 14. A fragment of a map of the structural-tectonic zonation of the East Black Sea region (compiled using materials [11; 12])

Заключение

Впервые детально изучены особенности строения, минеральный и химический состав пород дзыхринской толщи в каньоне р. Большая Хоста. Выявлено, что они имеют яркие отличительные черты относительно вмещающих их известняков, залегают на границе пород агурской и казачебродской свит, имеют аналоги в соседних структурно-формационных зонах, а значит, могут использоваться в качестве маркирующего горизонта при детальном геолого-картировочных работах или документации керна.

Список литературы

1. Александров Г.П., Ганешин Г.С., Зайцев И.К., Ильин К.Б., Соколов Р.И., Шапошников Г.Н., Якубасова Э.Г., Маймин Ю.С. Геологическая карта СССР. Масштаб 1: 1 000 000 (новая серия). Объяснительная записка. Лист К-(37), (38). Тбилиси. М. – Ленинград, 1986. 160 с.
2. Лаврищев В.А., Шейков А.А., Андреев В.М., Семенов В.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Скифская. Лист К37 (Сочи), К38 (Махачкала), К39. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 431 с.

3. Трихунков Я.И., Зеленин Е.А., Колесниченко А.А. Отчет по проекту «Новейшая тектоника как источник опасных геодинамических процессов Северо-Западного Кавказа (на примере ключевых участков). 2015. URL: http://neotec.ginras.ru/results/Res_2015_09.pdf (дата обращения: 14.08.2022).

4. Лаврищев В.А., Семенуха И.Н., Андреев В.М., Горшков А.С. Пояснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации М 1: 200 000. Издание второе. Кавказская серия. Лист К-37-IV (Сочи). СПб.: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2000.

5. Андреев В.М. Стратиграфическая схема черноморского побережья Кавказа // Геология и биоразнообразие мезозойско-кайнозойских отложений юга России: материалы Всероссийской научно-практической конференции, 20–24 июля 2015 г. Горячий Ключ, 2015.

6. Андрущук В.Л., Дубинский А.Я., Хаин В.Е. Геология СССР. Т. IX. Северный Кавказ. Ч. I. Геологическое описание. М.: Недра, 1968. 760 с.

7. Карелина Е.В., Марков В.Е., Блоков В.И. Перспективность Краснополянского района города Сочи на благороднометалльное оруденение // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 4. С. 497–504. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-4-497-504>

8. Мейснер А.Л. Основные разломы вала Шатского и их влияние на формирование структуры Восточно-Черноморского региона // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2009. № 4. С. 14–19.

9. Кушнарева А.В., Москаленко А.Н. Реконструкция параметров стресс-состояний Чвезипсинской, Абхазской, Краснополянской зон Северо-Западного Кавказа // Современная тектонофизика: методы и результаты: материалы Пятой молодежной тектонофизической школы-семинара. М.: ИФЗ, 2017. С. 250–254.

10. Аухатов Я.Г. Надвиговые движения и нефтеносность меловых отложений (Западная Сибирь, Крым) // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: сборник научных трудов / под ред. Е.Ю. Барабошкина. Симферополь: Черноморпресс, 2016. С. 38.

11. Гамкредидзе П.Д. Тектоника // Геология СССР. Т. X. Грузинская ССР. Геологическое описание. М.: Недра, 1964. С. 453–491.

12. Муратов М.В. История развития растительности и климата Юго-Восточной Чукотки в неоген-плейстоцене. М.: Наука, 1973. 135 с.

References

1. Alexandrov GP, Ganeshin GS, Zaitsev IK, Plyin KB, Sokolov RI, Shaposhnikov GN, Yakubasova EG, Maymin YS. *Geological Map of the USSR. Scale 1: 1,000,000*

(new series). Explanatory note. Sheet K-(37), (38). Tbilisi. Moscow, Leningrad; 1986. (In Russ.)

2. Lavrishchev VA, Sheikov AA, Andreev VM, Semenov VM. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (third generation). The Scythian series. List K37 (Sochi), K38 (Makhachkala), K39. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Publ.; 2011. (In Russ.)*

3. Trikhunkov YaI, Zelenin EA, Kolesnichenko AA. *Report on the project “The latest tectonics as a source of dangerous geodynamic processes in the North-West Caucasus (on the example of key sites)”*. 2015. (In Russ.) Available from: http://neotec.ginras.ru/results/Res_2015_09.pdf (accessed: 14.08.2022).

4. Lavrishchev VA, Semenukha IN, Andreev VM, Gorshkov AS. *Explanatory note to the State Geological Map of the Russian Federation M 1: 200,000. Second edition. Caucasian series. Sheet K-37-IV (Sochi). St. Petersburg: St. Petersburg: VSEGEI Publ.; 2000. (In Russ.)*

5. Andreev VM. Stratigraphic scheme of the Black Sea coast of the Caucasus. In: Pinchuk TN. (ed.) *Geology and Biodiversity of Mesozoic-Cenozoic Deposits of Southern Russia: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, 20–24 July 2015. Goryachy Klyuch; 2015. (In Russ.)*

6. Andrushchuk VL, Dubinsky AY, Khain VE. *Geology of the USSR. Vol. IX. The North Caucasus. Part I. Geological description. Moscow: Nedra Publ.; 1968. (In Russ.)*

7. Karelina EV, Markov VE, Blokov VI. Prospects of the Krasnopolyansky district of Sochi for noble metal mineralization. *RUDN Journal of Engineering Research. 2017;18(4):497–504. (In Russ.)* <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-4-497-504>

8. Meisner AL. The main faults of the Shatsky shaft and their influence on the formation of the structure of the Eastern Black Sea region. *Bulletin of the Moscow University. Series 4: Geology. 2009;(4):14–19. (In Russ.)*

9. Kushnareva AV, Moskalenko AN. Reconstruction of parameters of stress states of the Chvezhipsin, Abkhazian, Krasnopolyansk zones of the North-West Caucasus. *Modern Tectonophysics. Methods and Results: Materials of the Fifth Youth Tectonophysical School-Seminar. Moscow: IFZ Publ.; 2017. (In Russ.)*

10. Aukhatov YaG. Thrust movements and oil content of Cretaceous deposits (Western Siberia, Crimea). In: Baraboshkin EY. (ed.) *The Cretaceous system of Russia and the near abroad: Problems of Stratigraphy and Paleogeography: Collection of Scientific Works. Simferopol: Chernomorpress Publ.; 2016. (In Russ.)*

11. Gamkrelidze PD. Tectonics. *Geology of the USSR. Vol. X. Georgian SSR. Geological Description. Moscow: Nedra Publ.; 1964. p. 453–491. (In Russ.)*

12. Muratova MV. *History of development of vegetation and climate of south-eastern Chukotka in the Neogene-Pleistocene. Moscow. Nauka Publ.; 1973. (In Russ.)*

Сведения об авторах

Карелина Елена Викторовна, 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: 0000-0002-0929-4290, Scopus Author ID: 57215413670, eLIBRARY SPIN-код: 4919-8300; karelina-ev@rudn.ru

Мотузов Иван Сергеевич, старший преподаватель, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-2688-7629; motuzov-is@rudn.ru

Марков Владимир Евгеньевич, старший преподаватель, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-6594-0763, Scopus Author ID: 57216825569, eLIBRARY SPIN-код: 5882-5663; markov-ve@rudn.ru

Панасенко Юрий Николаевич, ведущий инженер, Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ), Российская Федерация, 117545, Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1; ORCID: 0000-0002-5799-3723, eLIBRARY SPIN-код: 5895-5788; panasenko1997.97@mail.ru

Жорж Наталья Владимировна, старший преподаватель, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-2839-8439, eLIBRARY SPIN-код: 5640-8670; zhorzh-nv@rudn.ru

Носаева Ольга Вячеславовна, заведующая лабораторией департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-0045-4750; nosayeva-ov@rudn.ru

About the authors

Elena V. Karelina, PhD of Geology, 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: 0000-0003-4691-4855, Scopus Author ID: 57215413670, eLIBRARY SPIN-code: 4919-8300; karelina-ev@rudn.ru

Ivan S. Motuzov, senior lecturer, 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: 0000-0002-2688-7629; motuzov-is@rudn.ru

Vladimir E. Markov, senior lecturer, 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: 0000-0001-6594-0763, Scopus Author ID: 57216825569, eLIBRARY SPIN-code: 5882-5663; markov-ve@rudn.ru

Yuri N. Panasenko, lead engineer, Central Geological Research Institute for Nonferrous and Precious Metals (TSNIGRI), 129 Varshavskoe Shosse St, Moscow, 117545, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5799-3723, eLIBRARY SPIN-code: 5895-5788; panasenko1997.97@mail.ru

Natalya V. Zhorzh, senior lecturer, 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: 0000-0003-2839-8439, eLIBRARY SPIN-code: 5640-8670; zhorzh-nv@rudn.ru

Olga V. Nosaeva, senior lecturer, 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: 0000-0003-0045-4750; nosayeva-ov@rudn.ru




DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-4-355-364
UDC 550.831.017-550.838.3

Research article / Научная статья

A regional and local geophysical study of the western overthrust belt in North-Western Huanuco, North Peru

Vladimir Yu. Abramov^a , Ilya V. Vikentyev^b 

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

^bInstitute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
 geophy-rudn@mail.ru

Article history

Received: August 21, 2022

Revised: October 14, 2022

Accepted: October 20, 2022

Keywords:

gravity data, magnetic data, local anomaly

Abstract. The complicated tectonic history of Northern Huanuco poses great difficulties for geophysical studies in the area. A terrain-corrected, regional Bouguer gravity map of the area has been produced which reflects this complexity. This map is dominated by a northwest grade, which is apparently the result of a Paleozoic tectonic boundary. This boundary seems to have at least locally exerted control on younger features leading to considerable superposition of structures in the area. The Andean chain straddles the western coast of the South American continent, parallel to a subduction zone where the Nazca plate descends beneath the South American continental plate. The area of our research was located in the northern part of the Huanuco province. Four sites were surveyed. The gravity values were calculated dataset and Bouguer corrections were applied. Finally, a Bouguer anomaly map of Peru and Bouguer anomaly maps of sites was produced based on these data.


For citation

Abramov VYu, Vikentyev IV. A regional and local geophysical study of the western overthrust belt in North-Western Huanuco, North Peru. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(4):355–364. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-355-364>

Региональные и локальные геофизические исследования западного пояса надвигов на северо-западе Хуануко, Северное Перу

В.Ю. Абрамов^a , И.В. Викентьев^b 

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Российская Федерация
 geophy-rudn@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 21 августа 2022 г.

Доработана: 14 октября 2022 г.

Принята к публикации: 20 октября 2022 г.

Аннотация. Сложная тектоническая история северной части провинции Хуануко создает большие трудности для геофизических исследований в этом районе. Составлена региональная карта гравитации Буге с поправкой на рельеф местности, которая отражает данную сложность.

© Abramov V.Yu., Vikentyev I.V., 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:

гравиразведочные данные, магнито-разведочные данные, локальные аномалии

На карте преобладают северо-западные ориентировки, которые, судя по всему, являются результатом влияния палеозойской тектонической границы. Выдвигается версия, что эта граница, по крайней мере локально, контролировала позицию более молодых объектов и тем самым повлияла на значительное усложнение структур в этом районе. Андская горная цепь тянется вдоль западного побережья Южноамериканского континента параллельно зоне субдукции, где океаническая плита Наска погружается под южноамериканскую континентальную плиту. Район проведения исследований располагался в северной части провинции Хуануко. Были обследованы четыре участка. Значения гравитационного поля рассчитаны по набору данных с применением поправки Буге. На основе этих данных составлена карта аномалий Буге территории Перу и карты аномалий Буге на участках исследований.

Для цитирования

Abramov V.Yu., Vikentyev I.V. A regional and local geophysical study of the western overthrust belt in North-Western Huanuco, North Peru // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 4. С. 355–364. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-4-355-364>

Introduction

Any study of the western overthrust belt in the Northern Huanuco, and Northern Lliata is hindered by the complex tectonic history of this region. At least locally, events prior to the formation of the overthrust belt have imparted structural features to the area which probably influenced the formation of this belt. Younger events (Basin and Range – Rio Marañon rift deformation) have left most of the region buried by alluvium, and block faulting associated with these events both follows and transects the overthrust belt [1–3]. In addition to the overthrust belt, Paleozoic and Mesozoic intrusive and sedimentary rocks in the area are also important in terms of gold and copper potential [1; 3; 4]. The Andean chain straddles the western coast of the South American continent, parallel to a subduction zone where the Nazca plate descends beneath the South American continental plate. The area of our research was located in the northern part of the province of Huanuco. Four sites were surveyed [5].

The purpose of the study is to clarify the geological reasons for the zoning of mineral deposits on the territory of Peru and Northern Huanuco.

1. Geologic and tectonic overview

Exposures of Paleozoic rocks in the study area (Figure 1) are somewhat limited. A. Pfiffner reports no significant Paleozoic outcrops in Southeastern Lliata west of Huanuco [3]. In far Southwestern Huanuco, Precambrian outcrops consist mainly of granite with locally abundant metamorphic rocks [3]. The exposures are more significant towards the east. In the Cordillera Huayhuash

Mountains the well exposed Precambrian Thunderbird Formation and its relation to the Precambrian Red Bluff Granite has been described in detail [1]. Although radiometric ages are available for outcrops in the Cordillera Huayhuash Mountains and farther east, the paucity of age data in far Southwestern Huanuco from either outcrop or deep exploration wells makes a regional interpretation of Precambrian events very tentative [3].

The Andean chain straddles the western coast of the South American continent, parallel to a subduction zone where the Nazca plate descends beneath the South American continental plate. During the Paleozoic, the area was dominated by the formation of the Marañon and Ualiago basins. A. Pfiffner and L. Gonzalez [3; 6] discuss in detail the development of these basins by correlating their stratigraphic and depositional similarities with the Permian Basin of West Huanuco and Southeastern Ancash (Figure 2). The Paleozoic strata in the study area are usually of shallow marine origin and thin generally towards the north [3].

While there are no Triassic rocks in the Marañon and Ualiago basins area [1; 3], the Middle Mesozoic was a time of major sedimentation in the Chihuahua trough [1]. The northwest marine transgression which followed during the Early Cretaceous [1; 7] resulted in a northward thinning Lower Cretaceous section. Triassic and Jurassic plutonism and volcanism in Southeastern Subandian zone are described [1; 4]. However [1] report that igneous activity of this age has not been recognized in Southwestern Huanuco.

Late Cretaceous-Early Tertiary deformation in the Eastern Cordillera Mountains of Huanuco was described by Hermoza et al. [1]. Drewes presents evidence

that the Cordilleran orogenic belt of South America is continuous from Southern Huanuco beyond El Paso and his analysis implies that extensive compressional features are buried in the subsurface of the study area [1].

The notion that the trend of the Huanuco uplift continues in the subsurface is verified by an exploration well drilled to basement on the Ucayaly (Figure 3) basin Uplift in Northeastern Huanuco [8].

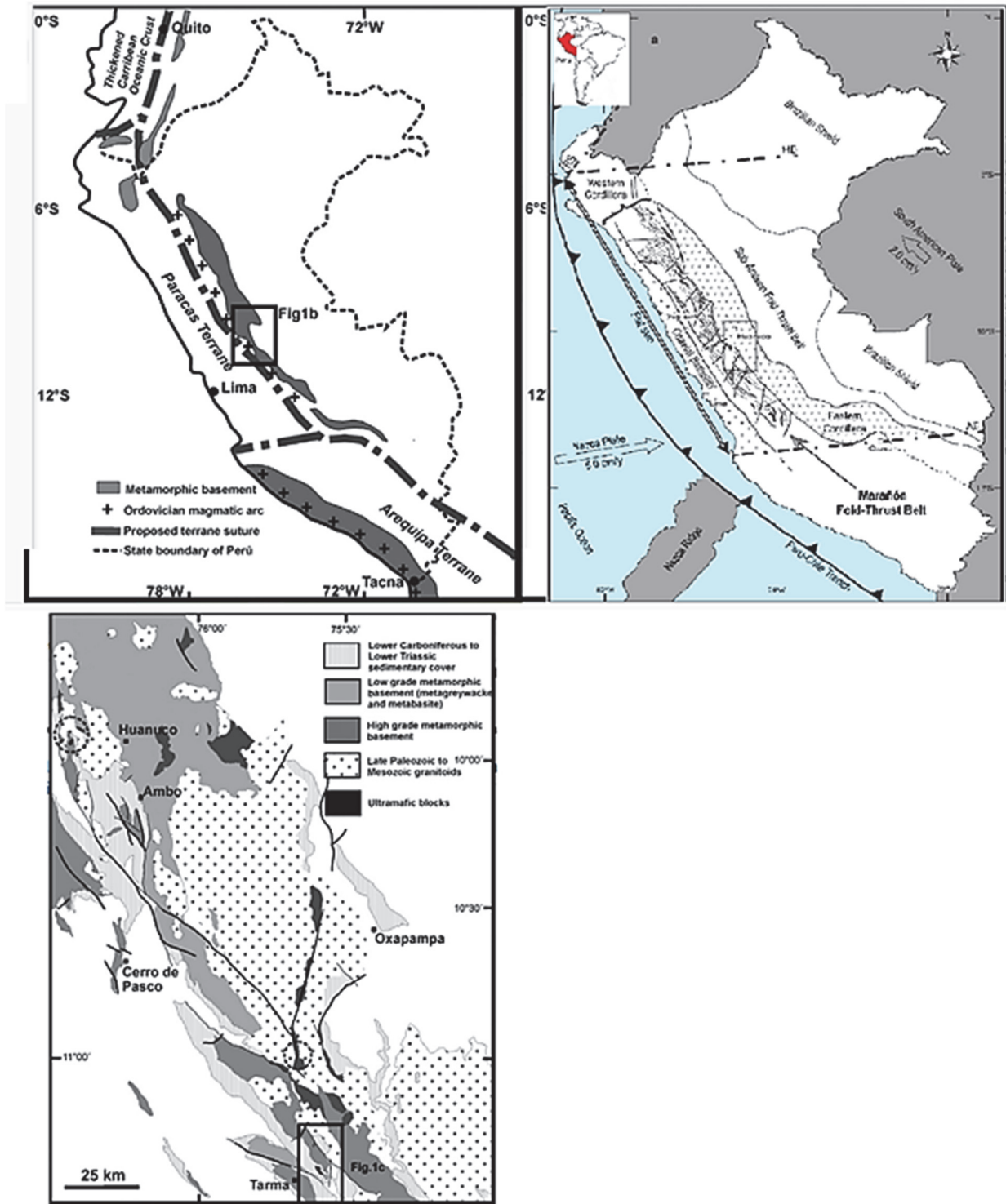


Figure 1. Overview geological maps of the study area (the upper left is the exits of the foundation and magmatic arcs, the upper right is the fault systems, the lower left is the map of location the work sites)



Figure 2. Index map of basins and uplifts in the region [1]

Cenozoic volcanism and block faulting are widespread in the study area. The dominant physiographic features are highstanding fault blocks composed of both sedimentary and volcanic rocks. Hermoza et al. [1] discusses the Cenozoic evolution of the Liata area, and describe the Cenozoic volcanic geology of this district and present a model for the Cenozoic evolution of the Marañon Rift.

Although the Cenozoic deformation of the study region is very pronounced, it is probably masking older structural trends of equal importance. Hermoza et al. [1] use the Quaternary fault trends, recent vol-

canism, high heat flow, and deep basin development as primary criteria for defining the southern portion of the Marañon rift. Using these criteria, the southeastern Cordilleras may define the southern limit of the rift. Their analysis of the shallow features which delineate the rift indicate a district deflection from north trending to northwest trending in the southern Marañon Basin. This deflection lies on trend with the older Burro-Florida structures and leads one to question how extensively Cenozoic deformation has altered older structures and how extensively older structures have guided Cenozoic deformation.

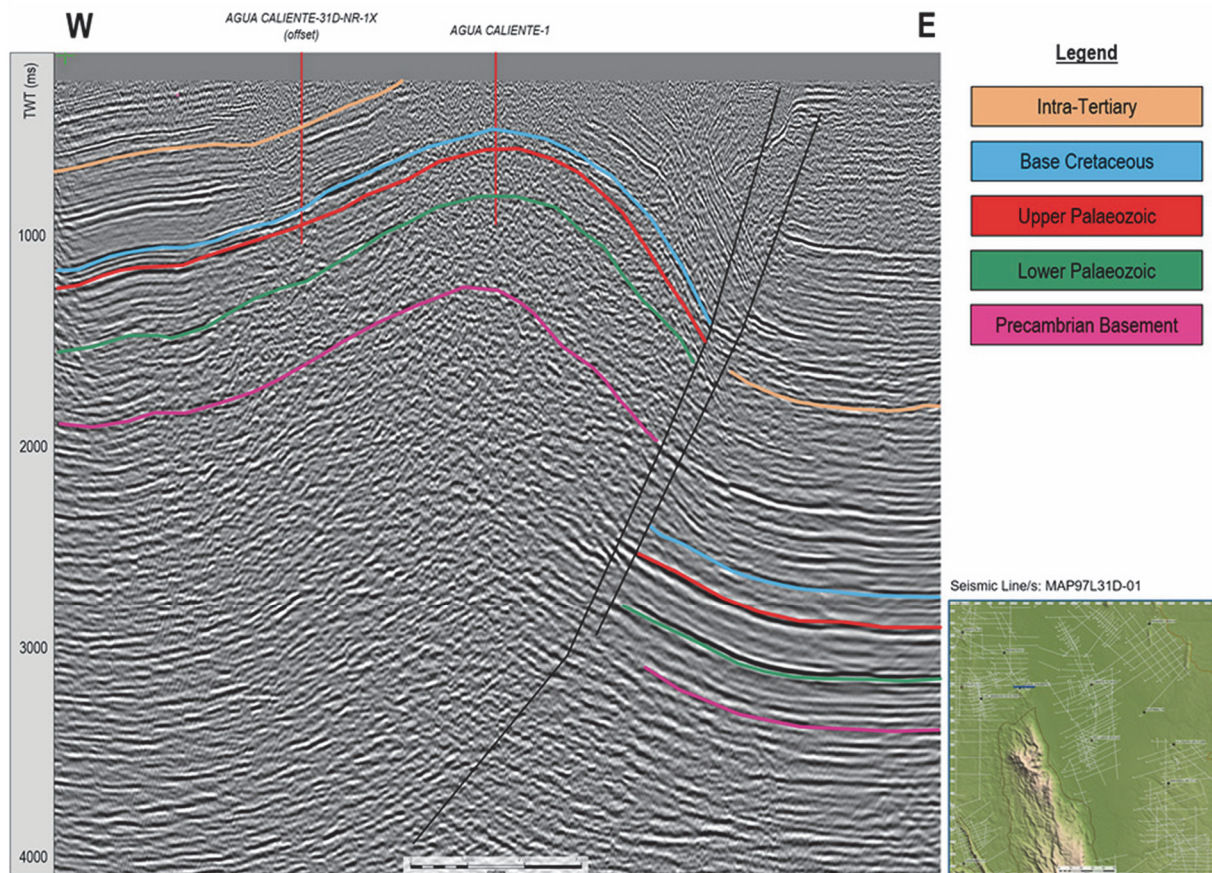


Figure 3. West-east section across the Agua Caliente structure showing the deep structure and the untested sub-thrust play (see foldout) [8]

2. Gravity data and interpretation

In order to provide reference gravity values, we utilized Japanese and Peruvian survey data collected between 1980 and 1998 [9; 10], and conducted more surveys in various parts of Peru in the 2020. Using these references, the gravity values were calculated dataset and Bouguer corrections were applied. Finally, a Bouguer anomaly map of Peru and in the studied areas was produced based on these data.

The gravity data of Figures 4, 5 represents complete Bouguer anomaly values computed for a sea level datum and reduction density of 2.67 gm/cc. These data were compiled from several sources [8; 9], and have been adjusted to the IGSN/71 base station network [11; 12]. Terrain corrections were computed using the computer programs of GravModel 1.1.5 [13] and should provide a significant improvement over previous maps [13]. The contours were drawn from grid values (2 km grid spacing) that were generated by the minimum curvature technique [5] as programmed by Surfer 8.

The data are somewhat sparse in northern Huanuco and the contours in that area show less detail than other portions of the map. However, in spite of this, a dominant northwest trend of anomalies is evident in southwest Liata and northern Huanuco. This northwest trend is generally parallel to the trend of the overthrust belt [1], and the Shira uplift, and the margin of the Ucayali Basin [1]. This northwest trend is also evident southeast of Huanuco where the strong north-south trend of the Shira is abruptly bent to the southeast. The dominance of this trend is surprising in light of the north-south trend of Basin and Range/Maranion rift structures in the area. Subanden Lineament [1] extends along roughly this same northwest trend. Pfiffner O. Adrian [3] noticed that a series of uplifts (the Deming Axis) also occur along this trend. This lineament is actuality several tens of kilometers wide and its origin is poorly understood. However, it seems to have served as a locus of deformation across eastern Cordillera, and western Cordillera from the Triassic to the present [10]. Thus,

this northwest trend probably is a result of the combined effects of a Paleozoic tectonic zone, the margin of a Mesozoic basin, the overthrust belt, and locally normal faulting. The structural interrelations between these features are complex but their correlations must be more than coincidence. Presently, it is not possible to separate the gravitational signatures of these features. However, efforts to separate these signatures via digital filtering are progress.

Several other relationships between structural features and gravity anomalies are worthy of note because of their possible significance. Outcrops of Mesozoic rocks in the Subanden zone in southeast Huanuco

also form a northwest trend. Gravity highs are associated with these outcrops and the apparent lack of an anomaly associated with the Big Mountains is probably due to the absence of any gravity stations in these mountains. This hole in the data coverage is a result of the problems with access and inadequate topographic mapping in this very remote area. Comparison of the western portion of the map (Figure 4) with the physiographic features (Figure 1) shows that topographic basins are marked by gravity lows and mountain ranges generally coincide with gravity highs. The Marañon Valley and Huallaga Valley are especially well defined by their gravity signature.

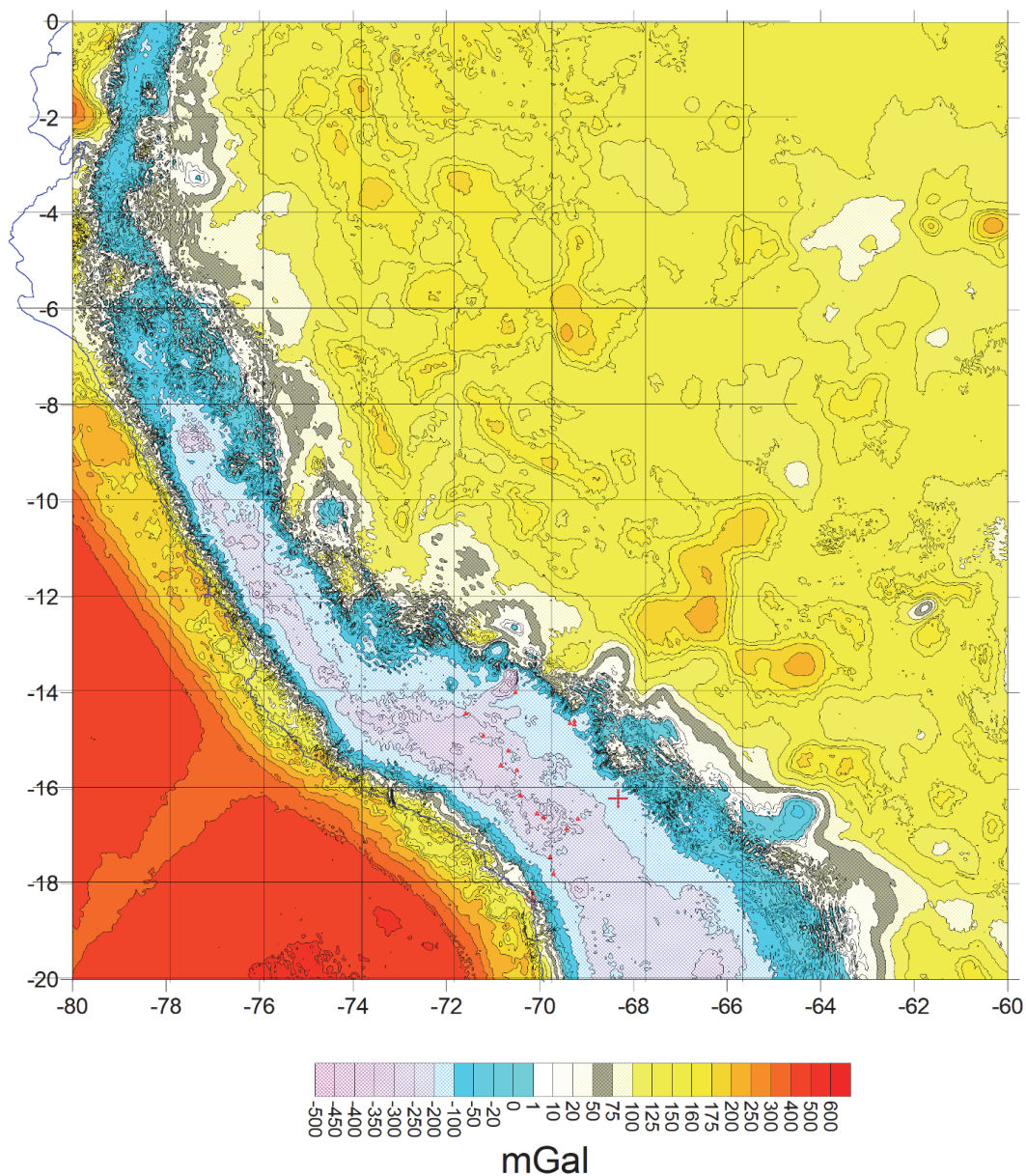


Figure 4. Complete Bouguer gravity map of Peru

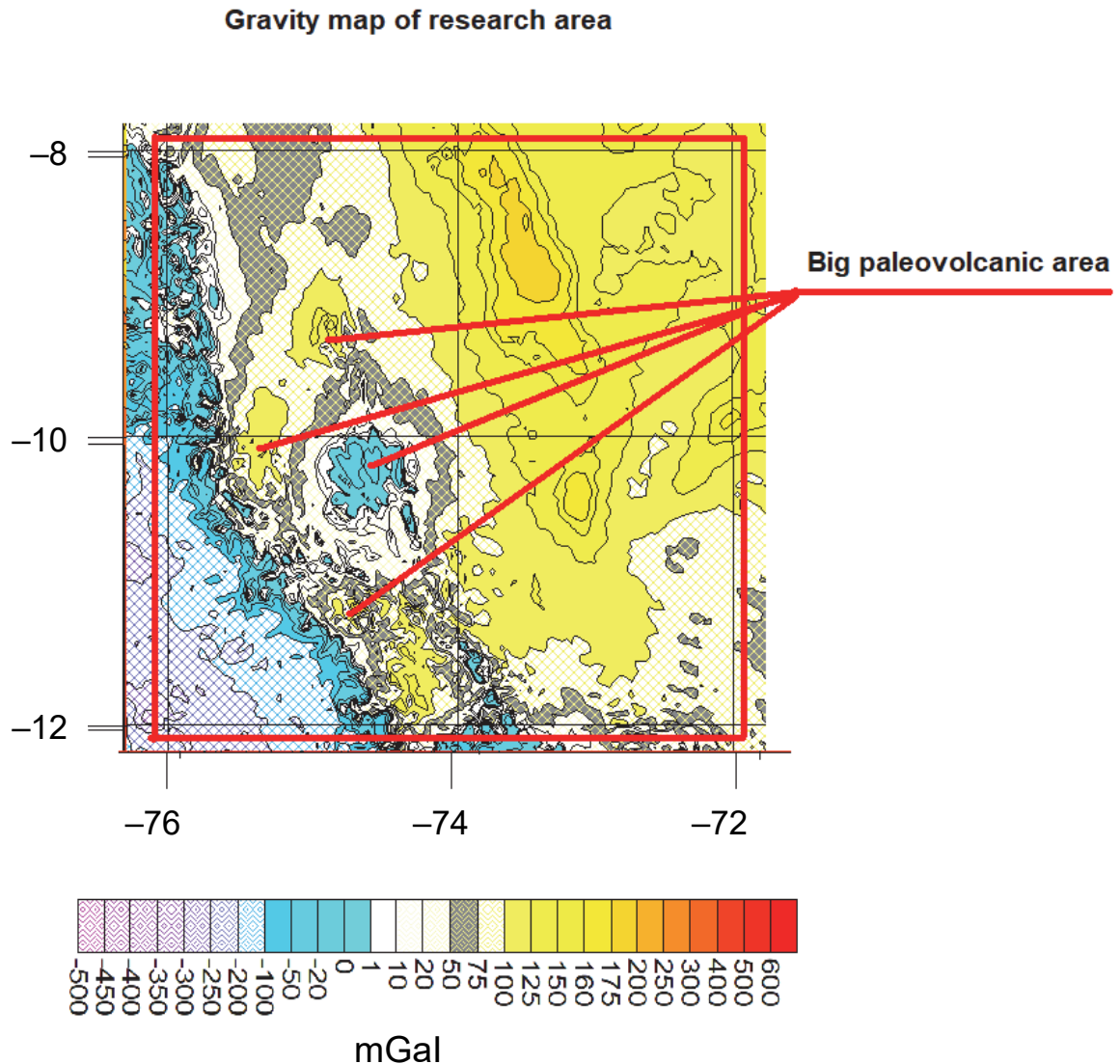


Figure 5. Complete Bouguer gravity map of the study area

The paleovolcanic fields in north Huanuco generally coincides with a gravity high. Directly northeast of the Lliata the surface geology would not predict the series of north-trending lows and highs seen on the gravity map. These anomalies suggest a complicated block-faulted subsurface structure in this area.

The Huallaga basin and Contaya arch trends north-northwest and coincides with several strong gravity lows. The faulting and subsurface structure of this area has received various interpretations and the pattern of gravity lows suggests that the structure is more complicated than of a single downfaulted block. There is a strong gravity high associated with the Eastern Cordillera. Southeast of Lliata, this high ceases to follow the topographic trend of the mountains.

The north-south trends north of Union have been associated with the Contaya Arch rift. However, the south-

east bend near Union and Lliata mentioned above represents an example of the overlapping of structures in the subsurface [1]. The intense gravity low associated with this portion of the bolson may be due to both Cenozoic fill and the overthrust belt. In fact, pre-thrust, normal faulting may also be present in the area [1].

3. Magnetic data and interpretation

In order to provide reference magnetic values, we utilized Peruvian survey data collected between 1980 and 1998 [9; 10], and conducted more surveys in various parts of Peru in the 2020. Using these references, the magnetic values were calculated dataset and variation corrections were applied. Finally, a magnetic anomaly map of Peru and in the studied areas was produced based on these data.

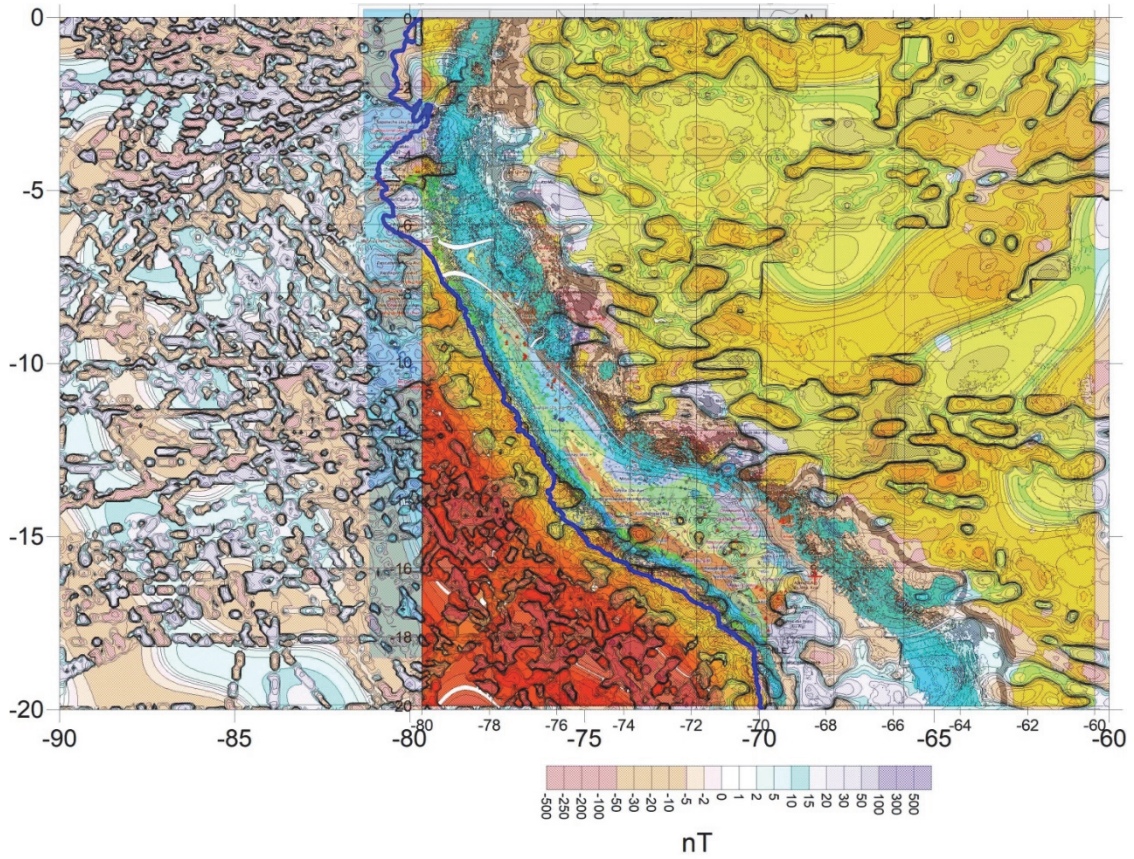


Figure 6. Map of magnetic anomalies of Peru

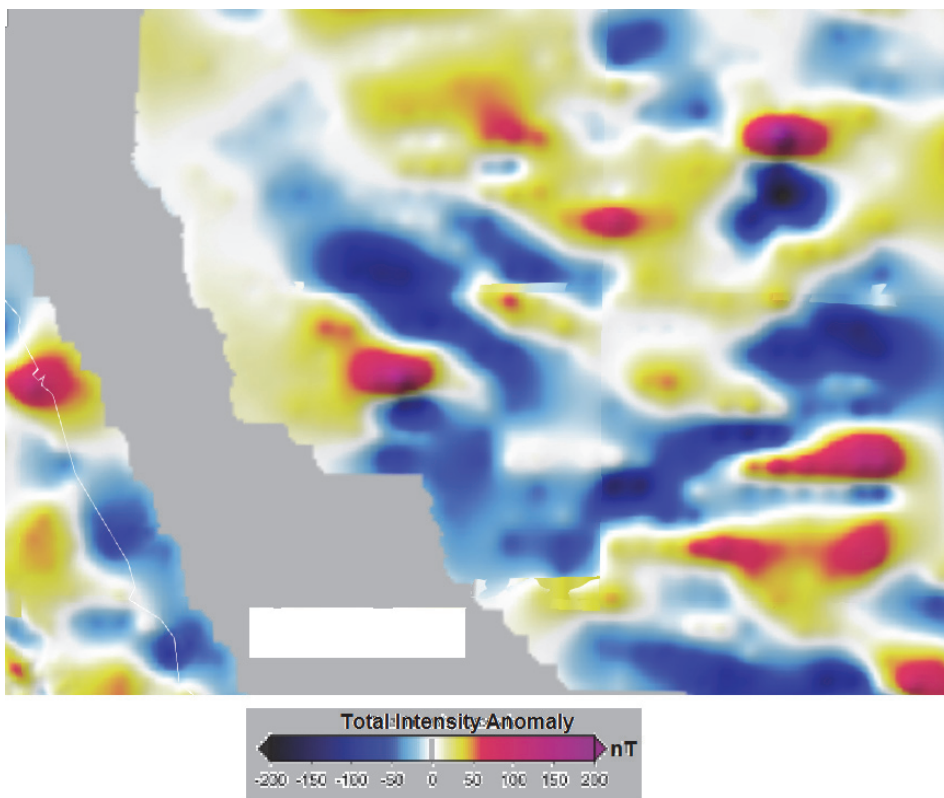


Figure 7. Map of magnetic anomalies of Huanuco (Peru)

The magnetic data of Figures 6 and 7, represents complete magnetic anomaly values computed for a sea level datum and total magnetic pole of 35 000 nT. These data were compiled from several sources Geological Survey of Peru) and have been adjusted to the IGRF-13 base station network [2; 14]. Terrain corrections were computed using the computer programs of MagModel 1.1.3v [13; 15–17] and should provide a significant improvement over previous maps. The normal magnetic field of the earth at the work sites was calculated using the IZMIRAN calculator. The contours [3] as programmed by Surfer 8.

Conclusion

The gravity and magnetic maps present here (Figures 4–6) defines the regional structural grain of the study area and delineates many local subsurface features. A northwest trend is clearly dominant and is probably the result of the superposition of several features. The overthrust belt is one of these features but existing geologic control and geophysical data are too sparse for a detailed interpretation. In addition to seismic reflection profiling, detailed gravity profiles could delineate some of the structural details of the thrusting with the aid of good geologic control. The extent to which the Marañon Fold-Thrust Belt Lineament, basement structures, and pre-existing basin margins affect the location of the overthrust belt seems to be a key question which further analysis of these gravity data may partially answer.

References / Список литературы

1. Hermoza W, Brusset S, Baby P, Gil W, Roddaz M, Guerrero N, Bolaños R. The Huallaga foreland basin evolution: thrust propagation in a deltaic environment, northern Peruvian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*. 2005;19: 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.06.005>
2. Idarraga-García J, Vargas CA. Depth to the bottom of magnetic layer in South America and its relationship to Curie isotherm, Moho depth and seismicity behavior. *Geodesy and Geodynamics*. 2018;9:93–107. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.09.006>
3. Pfiffner OA, Gonzalez L. Mesozoic – Cenozoic evolution of the western margin of South America: case study of the Peruvian Andes. *Geosciences*. 2013;3:262–310. <https://doi.org/10.3390/geosciences302026>
4. Wit WK, Hagemann SG, Ojala J, Laukamp C, Vennemann T, Villanes C, Nykanen V. Multiple methods

for regional-to mine-scale targeting, Pataz gold field, northern Peru. *Australian Journal of Earth Sciences*. 2014;61(1):43–58. <https://doi.org/10.1080/08120099.2013.763859>

5. Briggs IC. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*. 1974;39(1):39–48. <http://doi.org/10.1190/1.14404>

6. Robert F, Brommecker R, Bourne BT, Dobak PJ, McEwan CJ, Rowe RR, Zhou X. Models and exploration methods for major gold deposit types. In: Milkereit B. (ed.) *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. Toronto; 2007. p. 691–717.

7. Williams SE, Gubbins D. Origin of long-wavelength magnetic anomalies at subduction zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019;24:9457–9467. <https://doi.org/10.1029/2019JB017479>

8. Hodgson N, Rodriguez K, Searcher DU, Davies J, Found L. Discover geoscience. A story of oil exploration in the rainforests of Peru. *Geoscience Magazine GEO ExPro*. 2021;18(6):42–47.

9. Fernández M, Hormazábal S. Overview of recent advances in oceanographic, ecological and fisheries research on oceanic islands in the southeastern Pacific Ocean preface. *Latin American Journal of Aquatic Research*. 2014;42(4): 907–917. <https://doi.org/10.3856/vol42-issue4-fulltext-1>

10. Wise JM. Deformation and domains of the central Peruvian Andes: a spatial approach using surface data. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*. 2015;110:161–175.

11. Morelli C, Gantar C, McConnell RK, Szabo B, Uotila UA. *The International Gravity Standardization: Net 1971 (I.G.S. N. 71)*. Paris: Defense Technical Information Center; 1971.

12. Fukao Y, Kono M, Yamamoto A, Saito M, Perales C. Gravity measurement and data reduction for Bouger anomaly map of Peru. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*. 1999;74:161–266.

13. Abramov VYu, Novikov KV, Novikov PV, Petrov AA. *Laboratory workshop on magnetic exploration*. Version 3.4, rem. and add. Moscow: RUDN University; 2022. (In Russ.)

Абрамов В.Ю., Новиков К.В., Новиков П.В., Петров А.А. Лабораторный практикум по магниторазведке. Версия 3.4, испр. и доп. М.: РУДН, 2022. 87 с.

14. Petrov VG, Bondar TN. IZMIRAN candidate field model for IGRF-13. *Earth Planets and Space*. 2021;73:46. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01312-0>

15. Abramov VY. Petrophysical characteristics of geological – geophysical models of kimberlite pipes of the Archangelsk’ kimberlite province. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2008;(1):70–76. (In Russ.)

Абрамов В.Ю. Петрофизические характеристики геолого-геофизических моделей кимберлитовых тел архангельской алмазоносной провинции // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2008. № 1. С. 70–76.

16. Abramov VY, Brovkin VI. Some feature geology – geophysical models of placer deposits of diamonds. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2012; (4):24–29. (In Russ.)

Абрамов В.Ю., Бровкин В.И. Некоторые особенности геолого-геофизических моделей россыпных месторождений алмазов // Вестник Российского уни-

верситета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 4. С. 24–29.

17. Abramov VY, Kotelnikov AE, Kotelnikova EM, Usova VM, Rogova OYu. Integration of geophysical methods and space research in the search for deposits in the Miass district. Tyumen 2019: 6th Conference, 25–29 March. 2019;2019:1–3. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201900544>

About the authors

Vladimir Yu. Abramov, PhD of Geology, Association Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5833-9037, Scopus Author ID: 57209144217, eLIBRARY SPIN-code: 9447-5901; geophy-rudn@mail.ru

Ilya V. Vikentyev, Doctor of Geology, Leading Researcher, Laboratory of Ore Deposits, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, 35 Staromonetnyi Pereulok, Moscow, 119017, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9133-7562, Scopus Author ID: 6506542626, eLIBRARY SPIN-code: 2456-3030; viken@igem.ru

Сведения об авторах

Абрамов Владимир Юрьевич, 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: 0000-0002-5833-9037, Scopus Author ID: 57209144217, eLIBRARY SPIN-код: 9447-5901; geophy-rudn@mail.ru

Викентьев Илья Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория рудных месторождений, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии, Российская академия наук, Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35; ORCID: 0000-0001-9133-7562, Scopus Author ID: 6506542626, eLIBRARY SPIN-код: 2456-3030; viken@igem.ru