



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

2023 Том 24 № 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2

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

Научный журнал

Издается с 2000 г.

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

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

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

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, директор департамента механики и мехатроники 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 Ванвигелли», 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

Джа 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 13.05.2023. Выход в свет 20.05.2023. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 12,09. Тираж 500 экз. Заказ № 663. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6
Отпечатано в типографии ИПК РУДН им. Патриса Лумумбы
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-08-74; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2023 Volume 24 Number 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2

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

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

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, 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, 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 (TsNIMash), 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 named after Patrice Lumumba (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 named after Patrice Lumumba
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

Konstantinov M.S., Thant A.M. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 2. Algorithm and numerical analysis (Проектирование низкоэнергетических лунных перелетов, траектория которых проходит в окрестности точек либрации системы Земля – Луна. Часть 2. Алгоритм и численный анализ)	111
Орлов Д.А., Купреев С.А., Самусенко О.Е., Мельников В.М. Алгоритм поддержки принятия управленческих решений при автономном управлении космическими аппаратами в атмосфере планеты	121
Радин Ю.А., Конторович Т.С., Мнацаканян В.У. Влияние отклонений параметров в процессе пуска на термонапряженное состояние оборудования ТЭС	135
Ermakov D.N., Kupreev S.A., Samusenko O.E., Kuznetsov E.V., Kazenkov O.Yu., Burkova I.V. Technical and economic aspects of the development of green energy in the Middle East region (Технико-экономические аспекты развития зеленой энергетики в государствах Арабского Востока)	144
Сигитов О.Ю., Купреев С.А., Мнацаканян В.У. Положительный эффект распределения ветровых электростанций в электроэнергетической системе	157
Krivoshapko S.N. Kinematic surfaces with congruent generatrix curves (Кинематические поверхности с конгруэнтными образующими кривыми)	166
Лин З.Н., Скрынников А.В., Чижевский К.В., Сидоров В.Н. Математическая модель рекуперации электрической энергии транспортного средства	177
Ходяков А.А., Хлопков С.В., Истомин Д.В., Алибекова Д.Р., Нарожный А.А. Токсичность бензинового двигателя для средств малой механизации	187
Пичугин С.В., Котельникова Е.М., Усова В.М., Усов А.А. Результаты дистанционного анализа по поиску нового типа залежей нефти и газа в Оренбургской области	196

CONTENTS

Konstantinov M.S., Thant A.M. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 2. Algorithm and numerical analysis	111
Orlov D.A., Kupreev S.A., Samusenko O.E., Melnikov V.M. Management decision support algorithm for autonomous spacecraft's control in the planet's atmosphere	121
Radin Yu.A., Kontorovich T.S., Mnatsakanyan V.U. Influence of parameter deviations during start-up on the power plant equipment thermal stressed state	135
Ermakov D.N., Kupreev S.A., Samusenko O.E., Kuznetsov E.V., Kazenkov O.Yu., Burkova I.V. Technical and economic aspects of the development of green energy in the Middle East region	144
Sigitov O.Yu., Kupreev S.A., Mnatsakanyan V.U. Positive impact of wind farms distribution in the electric power system	157
Krivoshapko S.N. Kinematic surfaces with congruent generatrix curves	166
Lin Z.N., Skrynnikov A.V., Chizhevsky K.V., Sidorov V.N. Mathematical model of vehicle electrical energy recovery	177
Khodyakov A.A., Khlopkov S.V., Istomin D.V., Alibekova D.R., Narozhnyy A.A. Toxicity of a gasoline engine for small-scale mechanization	187
Pichugin S.V., Kotelnikova E.M., Usova V.M., Usov A.A. Results of remote analysis to find a new type of oil and gas deposits in the Orenburg region	196



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-111-120
EDN: CQFLUD
UDC 629.785

Research article / Научная статья

Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 2. Algorithm and numerical analysis

Mikhail S. Konstantinov , Aung Myo Thant 

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

 mkonst@bk.ru

Article history

Received: January 14, 2023

Revised: February 22, 2023

Accepted: March 4, 2023

Keywords:

low-energy trajectory, flight trajectory, gravitational perturbations, velocity impulse

Abstract. An algorithm for designing a low-energy lunar flight trajectory is presented. It is based on the assumption that low-energy flight trajectories pass through the vicinity of one of the collinear libration points of the Earth – Moon system (L1 or L2). It is also assumed that at the moment of spacecraft flight in the vicinity of the libration point, the elements of the osculating geocentric orbit of the spacecraft are close to the elements of the osculating geocentric orbit of the libration point itself. The results of a numerical analysis of the obtained low-energy lunar flight trajectory are presented. It is shown that the use of such a trajectory makes it possible to reduce the deceleration impulse of the velocity during the transition to a low lunar orbit to a value of 638 m/s (in the traditional flight scheme, this impulse turns out to be more than 800 m/s). The influence of solar gravitational disturbances on the flight trajectory is analyzed. It is demonstrated that these perturbations ensure the approach of the spacecraft to the Moon with a negative selenocentric energy constant and contribute to the temporary capture of the spacecraft by the Moon. The influence of the terrestrial gravitational perturbation on the circumlunar part of the trajectory is studied. It is displayed that on the trajectory found this perturbation effectively reduces the selenocentric velocity of the spacecraft. The conditions for spacecraft flight in the vicinity of the libration point are considered.

Acknowledgements

The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project No. 21-19-00683.

For citation

Konstantinov MS, Thant AM. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 2. Algorithm and numerical analysis. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):111–120. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-111-120>

© Konstantinov M.S., Thant A.M., 2023



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

The first part of the study: Konstantinov MS, Thant AM. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 1. Theory and method. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):7–16. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-7-16>

Проектирование низкоэнергетических лунных перелетов, траектория которых проходит в окрестности точек либрации системы Земля – Луна. Часть 2. Алгоритм и численный анализ

М.С. Константинов , А.М. Тант 

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

 mkonst@bk.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 января 2023 г.

Доработана: 22 февраля 2023 г.

Принята к публикации: 4 марта 2023 г.

Ключевые слова:

низкоэнергетическая траектория, траектория полета, гравитационные возмущения, импульс скорости

Аннотация. Приводится алгоритм проектирования низкоэнергетической траектории лунного перелета. Он основан на предположении о том, что траектории низкоэнергетического перелета проходят через окрестность одной из коллинеарных точек либрации системы Земля – Луна (L1 или L2). Предполагается, что в момент пролета космическим аппаратом окрестности точки либрации элементы оскулирующей геоцентрической орбиты космического аппарата близки к элементам оскулирующей геоцентрической орбиты самой точки либрации. Представлены результаты численного анализа полученной низкоэнергетической траектории лунного перелета. Показано, что использование такой траектории позволяет уменьшить тормозной импульс скорости при переходе на низкую окололунную орбиту до значения 638 м/с (при традиционной схеме перелета этот импульс оказывается больше 800 м/с). Проанализировано влияние солнечных гравитационных возмущений на траекторию перелета. Выявлено, что эти возмущения обеспечивают подлет космического аппарата к окрестности Луны с отрицательной селеноцентрической константой энергии и способствуют временному захвату космического аппарата Луной. Исследовано влияние земного гравитационного возмущения на окололунный участок траектории. Установлено, что на найденной траектории это возмущение эффективно уменьшает селеноцентрическую скорость космического аппарата. Рассмотрены условия пролета космического аппарата окрестности точки либрации.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-19-00683.

Для цитирования

Konstantinov M.S., Thant A.M. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 2. Algorithm and numerical analysis // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 111–120. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-111-120>

Introduction

The problem of analyzing low-energy trajectories to the Moon is considered in many publications [1–11]. The first part of the article [12] describes a new method for designing low-energy trajectories for a flight to

the Moon with the spacecraft (SC) insertion into a low lunar orbit. The method is based on the assumption that a low-energy trajectory can be obtained by using as an initial approximation a trajectory passing through the vicinity of one of the collinear libration points of the Earth-Moon system (L1 or L2). Additionally, it is assumed that on this trajectory, at the moment when the spacecraft approaches the libration point, the elements of the geocentric osculating orbit of the spacecraft are close to the corresponding elements of the geocentric osculating orbit of the libration point. Thus, the method assumes

Первая часть исследования: Konstantinov M.S., Thant A.M. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 1. Theory and method // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 7–16. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-7-16>

a narrowing of the space of analyzed trajectories. The authors do not claim that there are no low-energy lunar flights that cannot be carried out obtained using a smooth continuation of the trajectories considered in the paper as an initial approximation. But we believe that many (if not most) low-energy lunar trajectories can be obtained using a trajectory passing through the vicinity of the considered libration points as an initial approximation.

The problem statement assumes that the impulse trajectory of the flight from low Earth's orbit (LEO) to low Moon orbit (LMO) is being analyzed. It is assumed that the altitude and inclination of LEO and the altitude of LMO are known. The selectable (optimized) characteristics of the flight trajectory are: the date of start (T_{st}) at the analyzed given epoch, the longitude of the ascending node of the LEO (Ω), the latitude argument of the starting point (u_o), the magnitude of the accelerating velocity impulse at the start (ΔV_i), the flight time to the target orbit of the artificial satellite of the moon (t_p), the magnitude and direction of the braking velocity impulse at the end point of the flight trajectory to the moon (ΔV_{br}).

The listed characteristics should be chosen so as to:

1) ensure the solution of the transport problem (insertion into the target LMO) and

2) the cost of solving the transport problem is minimal. The considered optimization criterion is either the summary velocity impulse or the magnitude of the velocity impulse, which ensures the insertion of the spacecraft into LMO when SC approaching this orbit (ΔV_{br}).

To analyze the passage of a spacecraft in the vicinity of the libration point, the sum of three non-negative quantities (three distances) is considered: $J = \Delta r_L + |r_{SCp} - r_{Lp}| + |r_{SCa} - r_{La}|$, where the first term Δr_L is the SC distance from the libration point (it is found as the difference between the geocentric vectors of the SC and the libration point); r_{SCp} and r_{SCa} – radius of perigee and apogee of the osculating geocentric orbit of the SC; r_{Lp} and r_{La} – perigee and apogee radius of the osculating geocentric orbit of the libration point.

The J -function depend on the four parameters of the flight pattern T_{st} , Ω , u_o , r_a , which determine the conditions for the motion of the SC after its launch from LEO, and the current time of motion of

the SC t : $J(T_{st}, \Omega, u_o, r_a, t)$. On each flight trajectory, there is a time t_1 when J is minimal. Let us define this minimum value as I and call it the total miss of the libration point:

$$I(T_{st}, \Omega, u_o, r_a) = \min_t J(T_{st}, \Omega, u_o, r_a, t), \quad (1)$$

The paper describes the developed algorithm and analyzes the numerical results of the obtained low-energy lunar trajectory.

1. Algorithm for designing a low-energy flight trajectory to the circumlunar orbit

The developed method for designing low-energy flight trajectories assumes the following sequence of operations.

At the first stage, such parameters of the flight pattern T_{st} , r_a , are found, which ensure that the SC enters the vicinity of the libration points and the minimum total miss of this point. More specifically, the task of the stage is formulated as follows: in the space of two of the listed parameters T_{st} , r_a , find such a set of them that minimizes the total miss of the libration point I . In this case, the values of the parameters Ω and u_o do not vary and are taken equal to the values described in Section 3.1.

The enumeration of, r_a is used. The parameters changed with a fairly small step. The launch date increment is one hour; parameter r_a increment is 5 thousand km. The launch date change range is one year for the considered launch epoch. Range of parameter r_a is 1–1.5 million km. For each pair of values of these parameters, a system of differential equations is integrated that describes the geocentric motion of the SC in the restricted 4-body problem. There is such moment of time t_1 when the sum J is minimal. An analysis of the dependence of I as a function of T_{st} and r_a makes it possible to choose a relatively small number of start dates for the epoch under consideration, using which it is possible to fly over the vicinity of the libration point and enter the vicinity of the Moon. These dates and the values of the r_a parameter for them are considered as an initial approximation when searching for low-energy flight trajectories.

At the next 2nd stage, I is considered as a function of four variables T_{st} , r_a , Ω , u_o . The unconditional minimum I is found as a function of these variables (the method of local search is used) and the time

when the SC hits the vicinity of the libration point t_1 corresponding to this minimum.

Further, the SC trajectory is considered to consist of geocentric and selenocentric sections. At the point of transition from the geocentric to the selenocentric section, an intermediate velocity impulse is introduced into consideration. In this case, the space of the chosen parameters of the flight pattern increases by 5 units (the magnitude of the velocity impulse ΔV_c , its declination α and right ascension δ , the time (date) of this velocity impulse t_{geo} , and the time of movement in the selenocentric segment t_2). Thus, the condition for the fulfillment of the transport problem [12] is transformed into the condition:

$$H(T_{\text{st}}, r_a, \Omega, u_o, t_{\text{geo}}, \Delta V_c, \alpha, \delta, t_2) = H_f. \quad (2)$$

At the next 3rd stage, such ΔV_c , α , δ and t_2 are determined, at which the SC flies up to the Moon at a distance equal to the height of the circumlunar orbit. The remaining parameters of the flight pattern (the function arguments in (2)) do not vary, while t_{geo} is assumed to be equal to t_1 .

The next three stages of the developed algorithm are based on the gradient projection method, which ensures the constant achievement of a given approach altitude to the Moon. The optimization criterion is the sum of the values of the intermediate velocity impulse and the velocity impulse during the transition to a circumlunar orbit. The stages differ in the number of optimized parameters of the flight pattern. From stage to stage, this number increases from 4 (ΔV_c , α , δ and t_2) to 5 (t_{geo} , ΔV_c , α , δ and t_2) and finally to 9 (T_{st} , r_a , Ω , u_o , t_{geo} , ΔV_c , α , δ and t_2).

At the last stage of the algorithm, the value of the intermediate velocity impulse is excluded from the number of the selected parameters of the flight scheme. This value iteratively decreases. The fulfillment of the condition (1) is ensured by the choice of the remaining arguments of this function. In this

case, a situation is possible, in which it is not possible to bring the intermediate velocity impulse to a zero value. Such a solution can be quite good from the point of view of the summary velocity impulse. That is, if the sum of the intermediate impulse and the impulse that transfers the SC to a LMO is sufficiently small, then the flight trajectory can be considered low-energy.

2. Numerical analysis of the flight trajectory to the Moon

As an example, the problem of a flight to a LMO with a height of 100 km from a LEO with an altitude of 200 km and an inclination of 51.6° is considered. The start date is 2024. The position of the plane of the LMO is not fixed.

The situation in which the libration point L2 is passed is analyzed. Figure 1 shows the level lines of the total miss of libration point I as a function of the start day (X-axis, the first 2920 hours of 2024, from January 1st to May 1st are considered) and r_a (Y-axis). The level lines are shown, on which I is less than 300 thousand km.

An analysis of the figure shows that for the considered range of launch dates in 2024, there are several areas of launch dates, using which it is possible: 1) to ensure that the SC enters the vicinity of the libration point; 2) to ensure that the shape and size of the osculating geocentric orbit of the SC are close to the shape and size of the osculating orbit of the libration point. It is proposed to explore each of these areas for the possibility of implementing a low-energy lunar flight. In particular, it is possible to provide a small total miss of the libration point in the range of start dates from March 23 to April 15 of the year under consideration. The minimum value of the total miss turned out to be 38.6 thousand km. Such a miss is obtained if we choose March 29, 2024 as the launch date (2133 hours of this year) and r_a equal to 11.5 million km.

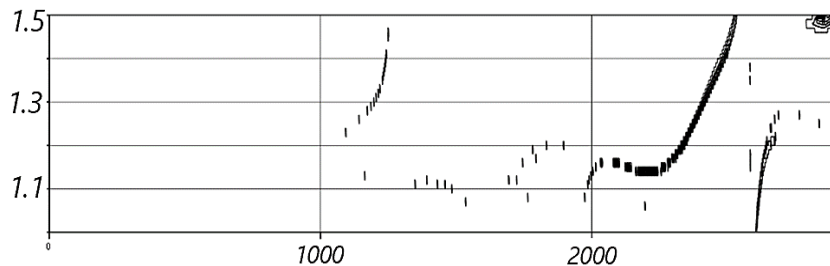


Figure 1. The level lines of the total miss of the libration point I on the plane: launch date (X-axis, hours of 2024) – r_a (Y-axis, million km)

The table shows the main characteristics of one of the obtained low-energy flight trajectories.

The velocity impulse during the transition to the LMO turned out to be 638.1 m/s. The velocity

impulse during the transition to the circumlunar orbit has a small radial component (3.15 m/s). The transverse component of the velocity impulse is negative (−638.1 m/s).

Main characteristics of the low-energy transfer trajectory

Characteristic	Value
Launch date	5 April 2024
Julian launch date	2460405.8865
Intermediate geocentric orbit apogee radius (r_a), thousand km	1269.6106
The value of the first velocity impulse, m/s	3197.702
The ascending node longitude of LEO Ω	−0.075797°
Perigee argument of intermediate geocentric orbit u_0	−12.403506°
Total flight time, days	87.52329
Maximum distance of the SC from the Earth, thousand km	1735.6
Minimum SC distance from the libration point L2 on the flight trajectory, thousand km	18.620
Selenocentric orbital energy constant at the moment of maximum approach of the SC to the libration point, km^2/s^2	−0.138
The magnitude of the velocity impulse during the SC transition to LMO ΔV_{br} , m/s	638.09556
Radial component of velocity impulse ΔV_{br} , m/s	3.14854
Transverse component of the velocity impulse ΔV_{br} , m/s	−638.08779

Thus, the use of such a trajectory makes it possible to reduce the deceleration impulse of the velocity during the transition of the spacecraft to a low circumlunar orbit to the value of 638 m/s. Let us pay attention to the fact that in the traditional scheme of flight to the Moon with access to a low circumlunar orbit this impulse turns out to be more than 800 m/s. That is, the gain in the velocity impulse turns out to be very large (at least it is 140 m/s).

2.1. Characteristics of a low-energy trajectory

Figure 2 shows the projections of the geocentric trajectory of the flight to the Moon on the x – y plane of the ecliptic and on the z – y plane. The dotted line shows the projections of the geocentric Moon’s orbit. In the scale adopted in the figure,

the trajectory begins virtually from a point with zero coordinates and ends at a point in the Moon’s orbit.

The black diamond shows the position of the libration point L2 at the moment of the maximum approach of the SC to this point. The maximum distance of the SC from the Earth occurs on the 37.064th day of the flight and is equal to 1.408 million km. It should also be noted that the radius of the apogee of the intermediate orbit is 1.270 million km. That is, solar gravitational disturbances ensured an increase in the SC distance from the Earth to the region where these disturbances are large. The SC stays in this region for a long time, which contributes to a large deformation of the geocentric orbit by the solar gravitational disturbance.

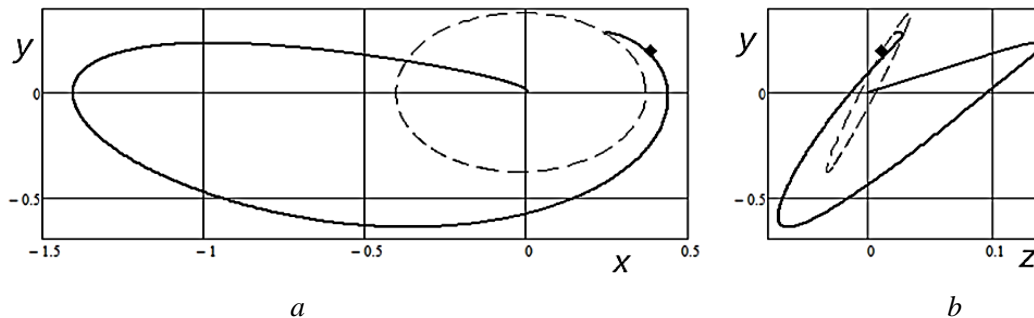


Figure 2. Flight trajectory in the geocentric ecliptic coordinate system, distance unit is 1 million km: a – projection onto the x – y plane of the ecliptic; b – projection onto the z – y plane

The SC flight time from the point of greatest distance from the Earth to the vicinity of the libra-

tion point is 48.9 days. At this time interval, the declination of the geocentric radius vector of the SC

with respect to the plane of the ecliptic is very small (it varies in a narrow range from $+4^\circ$ to -7°).

Figure 3 shows the projections of perturbing gravitational accelerations in the study of the geocentric trajectory of the SC. The time interval from the launch of the SC from a low Earth orbit to the moment of approach of the SC to the libration point (85.93 days) is considered. The perturbing solar acceleration Φ_{Sun} is analyzed in the left figure, and

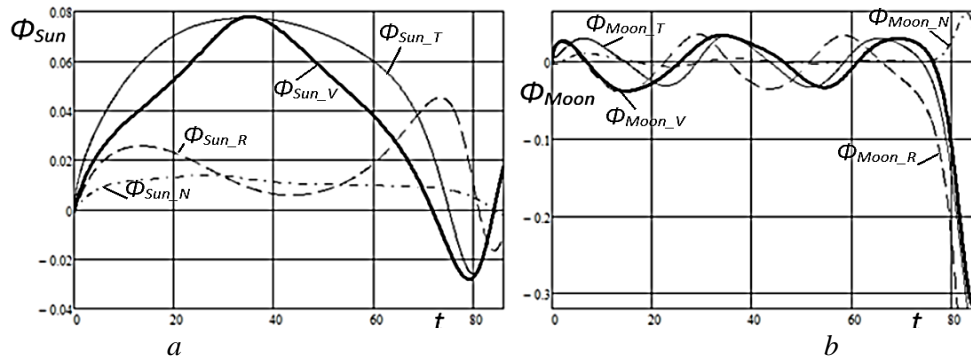


Figure 3. Projections of perturbing solar gravitational acceleration Φ_{Sun} , mm/s^2 (a) and projections of perturbing lunar gravitational acceleration Φ_{Moon} , mm/s^2 (b) as the functions of flight time (day); the geocentric part of the trajectory

It can be seen that significant part of the considered part of the trajectory (0–71.7 days) the projection of the solar gravitational acceleration in the velocity direction Φ_{Sun_V} is positive. The maximum value of this acceleration (0.078 mm/s^2) is reached on the 35.15th day of the flight, when the SC is at a great distance from the Earth (1.405 million km). Solar gravitational acceleration actively increases the geocentric velocity of the SC, increasing the radii of the apsidal points of the geocentric osculating orbit of the SC. The transversal component of the perturbing acceleration Φ_{Sun} is also positive over a long-time interval. This contributes to an increase in the semilatus rectum of the osculating geocentric orbit of the SC. The radial component of the perturbing acceleration Φ_{Sun} is somewhat smaller than the transversal one, but is positive over a longer time interval. The normal component of the perturbing solar acceleration with respect to the other components is quite small.

The projections of the perturbing lunar acceleration (right figure) on a significant part of the considered trajectory are sinusoidal. Because of this, they do not create significant perturbations of the elements of the SC's geocentric orbit. As the SC approaches the vicinity of the libration point, perturbing lunar acceleration becomes very large. The projection of this acceleration onto the velocity direction reaches a value equal to -0.3 mm/s^2 . At this moment,

the lunar perturbing acceleration Φ_{Moon} is analyzed in the right figure. The thick lines show the projections of perturbing accelerations on the direction of the geocentric velocity of the SC (Φ_{Sun_V} and Φ_{Moon_V}). Thin solid lines show transversal projections of perturbing accelerations (Φ_{Sun_T} and Φ_{Moon_T}). Dashed and dash-dotted lines show the radial (Φ_{Sun_R} and Φ_{Moon_R}) and normal (Φ_{Sun_N} and Φ_{Moon_N}) components of the perturbing accelerations.

the transversal, radial, and even normal components of the perturbing acceleration are also large.

Figure 4 shows the projections of perturbing gravitational accelerations in the study of the selenocentric trajectory of the SC. The time interval from 76 days of flight to the moment the SC enters the LMO is considered. The left figure analyzes the disturbing terrestrial acceleration Φ_{Earth} , and the right figure analyzes the solar disturbing acceleration Φ_{Sun} . The same notation is used as in the previous figure (Figure 3).

Note the following properties of the given characteristics. Solar perturbing gravitational accelerations are less than perturbing Earth's accelerations by two orders of magnitude. They have very little effect on the trajectory of the SC. The projection of the perturbing terrestrial acceleration on the direction of the selenocentric velocity (thick line) is negative over the entire trajectory under consideration. On almost the entire trajectory (except for its final section), the value of this projection is significant (of the order of 1 mm/s^2). This ensures a decrease in the energy of the SC's selenocentric motion and a temporary capture of the SC by the Moon. The transversal component of the perturbing terrestrial acceleration (thin solid line) is also negative. This contributes to a decrease in the semilatus rectum of the selenocentric osculating orbit of the SC. The radial and normal components of

the perturbing acceleration (dotted and dash-dotted lines) have less effect on the SC trajectory.

Figure 5 shows the change in some osculating elements of the geocentric trajectory of the SC. The time interval from the launch of the SC from a low Earth orbit to the moment of approach of the SC to the libration point is considered. The left figure (a) shows the change in the osculating eccentricity. It can be seen how the solar gravitational acceleration reduces the eccentricity from the eccentricity of the intermediate orbit 0.989702 to 0.268581 at the moment of the maximum approach of the SC to the libration point.

The central figure (b) shows the change in the semilatus rectum (dashed line) and perigee radi-

us (solid line) of the osculating geocentric orbit. The effective increase in these elements due to the solar disturbance on a large initial part of the trajectory is replaced by some decrease as the SC approaches the libration point. The main reason for this is the lunar gravitational perturbation. The right figure (c) shows the change in the apogee radius of the osculating geocentric orbit. This element actively decreases as the SC approaches the libration point due to lunar disturbances.

Figure 6 shows the change in the SC distance from the libration point D over the entire flight trajectory (a) and on the last six days of the flight (b). The minimum SC distance from the libration point (18 620 km) is reached on the 85.93th flight day.

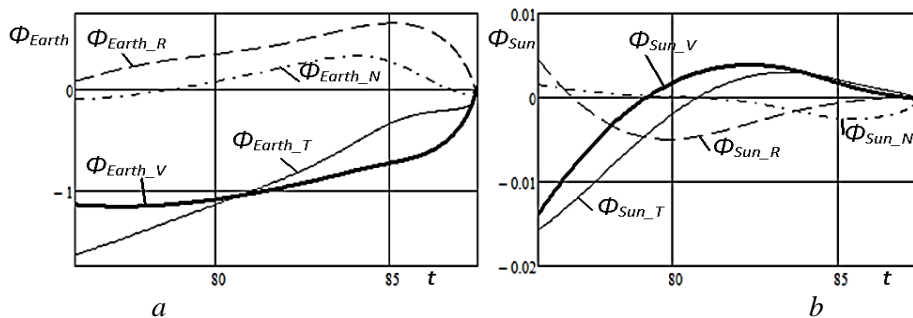


Figure 4. Projections of the perturbing Earth's gravitational acceleration Φ_{Earth} , mm/s^2 (a) and projections of the perturbing solar gravitational acceleration Φ_{Sun} , mm/s^2 (b) as a function of the flight time (day); the selenocentric section of the trajectory

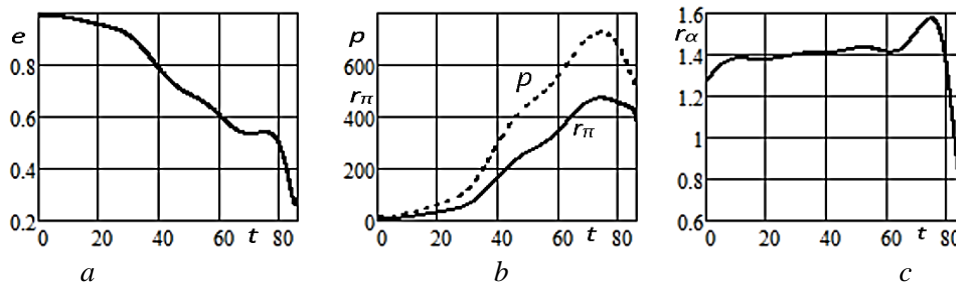


Figure 5. The osculating elements of the geocentric orbit of the SC as the functions of time (day) on the trajectory until the SC approaches to the libration point: a – the eccentricity; b – the semilatus rectum p and perigee radius r_{π} , thousand km; c – the radius of the apogee, million km

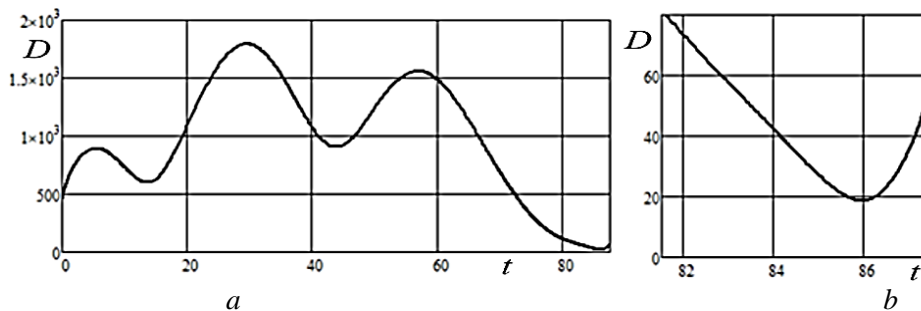


Figure 6. SC distance from the libration point, thousand km, as a function of time (day) on the entire flight trajectory (a) and on the last seven days of flight (b)

At the moment of closest approach of the SC to the libration point, the radius vector of the SC is 422.8 thousand km. The geocentric radius vector of the libration point at this moment of time is 432.4 thousand km. That is, the SC is located closer to the Earth than the libration point by almost 10 thousand km. This explains why the radii of the apsidal points of the osculating geocentric orbit of the SC at this moment of time are less than the radii of the apsidal points of the osculating geocentric orbit of the libration point. For example, the perigee radius of the SC orbit is less than the perigee radius of the osculating orbit of the libration point by 30 400 km.

Figure 7 shows the change in the energy constant h_{Sel} of the osculating selenocentric orbit as a function of flight time. It can be seen that on 81.371 day of flight this constant becomes negative and continues to decrease. There is a “capture” of the SC by the Moon. At the moment when the SC is at the minimum distance to the libration point (85.930 days of flight), the energy constant of the SC's selenocentric motion is $-0.138 \text{ km}^2/\text{s}^2$. This point is shown as a black diamond on the graph.

It is noteworthy that the energy constant of the selenocentric orbit changes significantly even on the last day of the flight. The right Figure 7 shows the change in this element of the osculating orbit during the last three hours of the flight. During these 3 hours, the value of the selenocentric radius of the SC vector decreases from 11 405.6 km to 1838 km. And gravitational perturbations from the Earth non-monotonically change the energy constant of the selenocentric motion.

At the end of the flight (before the implementation of the braking impulse of velocity), the energy constant of the osculating selenocentric orbit is $-0.176 \text{ km}^2/\text{s}^2$. At this moment, the elements of the osculating selenocentric orbit turned out to be as follows: eccentricity 0.934028, periapsis radius 1837.996 km, apoapsis radius 53882.842 km; the true anomaly of the osculating orbit is 359.836° .

The projections of the selenocentric trajectory when the spacecraft approaches the LMO and the projections of this orbit are shown in Figure 8. The approaching trajectory of the SC (a highly elongated elliptical orbit) practically touches the LMO (shown by a thin line).

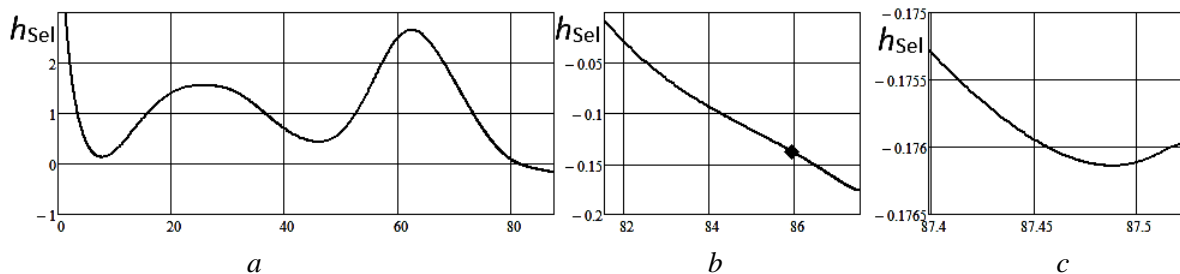


Figure 7. The change in the energy constant of osculating selenocentric orbit, km^2/s^2 , as a function of time (day) on the flight trajectory: a – during of the entire trajectory of the flight; b – during of the last six days of the flight; c – during of the last three hours of the flight

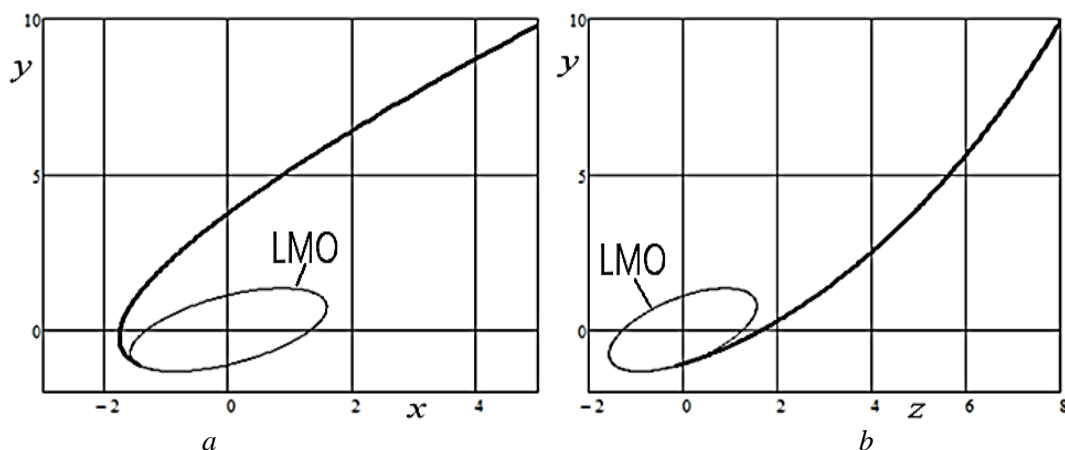


Figure 8. Projections onto the x - y plane of the ecliptic (a) and onto the z - y plane (b) of the selenocentric trajectory when the SC approaches the LMO; distance unit is 1 thousand km

2.2. Conclusions on the numerical analysis

The analyzed low-energy trajectory of the flight to the Moon, as we assumed, pass through the vicinity of the L2 libration point of the Earth – Moon system. The minimum distance to this libration point turned out to be 18.6 thousand km. At the time of the minimum approach of the SC to the libration point, the SC was closer to the Earth than the libration point (by 9.60 thousand km). Apparently, this explains the fact that the radii of the perigee and apogee of the osculating orbit of the SC at the moment of minimal approach to the libration point seemed to be less than the radii of the perigee and apogee of the osculating geocentric orbit of the libration point. This did not prevent us from using the trajectory with the minimum total miss of the libration point I (1) as the initial approximation to obtain the trajectory of the temporary capture of the SC by the Moon. At the moment of passage of the libration point, the selenocentric energy constant is negative ($-0.138 \text{ km}^2/\text{s}^2$).

An analysis of the level lines in Figure 1 makes it possible to assume that the launch window is wide enough for the considered type of flight trajectories in the considered time interval of 2024. The duration of the launch window is about 30 days (March 20 – April 20). Within the launch window, the intermediate orbit apogee radius (r_a) is a nonmonotonic function of the launch date.

The developed method is quite labor-intensive, and we expect future improvement. The solution of the following problems is considered. When using local search methods (at the second and subsequent stages of the developed algorithm), derivatives of the motion conditions at the end point of the flight trajectory are used. They are currently calculated using the central difference algorithm. Under conditions of high sensitivity of the considered trajectory, it is very difficult to achieve high accuracy of these derivatives. A possible solution to the problem of the accuracy of these derivatives is to use the apparatus of complex numbers or dual numbers [13; 14].

Calculation of derivatives with high accuracy can make it possible to use the necessary optimality conditions for the constrained optimization problem of the flight trajectory. Since the optimality conditions themselves contain derivatives of the characteristics of the trajectory with respect to the choosing parameters of flight pattern, the use of local optimization methods will be impossible without finding the second derivatives. A new difficult problem arises,

i.e., finding the second derivatives of the characteristics of the trajectory at the end of the flight with respect to the parameters of the flight pattern. Its solution can lie in the use of dual complex numbers [15].

Conclusion

The numerical analysis showed the operability of the proposed method for designing trajectories for a low-energy flight to the Moon with the SC insertion into the low lunar orbit. The main feature of the method is the assumption that the flight trajectory lies in the vicinity of the libration point of the Earth – Moon system and during this passage some restrictions are introduced on the magnitude and direction of the SC velocity. We do not claim that all low-energy flight trajectories satisfy these conditions. The authors argue that there are low-energy transfer trajectories passing through the neighborhood of libration points and propose a method for finding such trajectories.

On the flight trajectory, obtained using the developed method, it was possible to reduce the decelerating impulse of the velocity when entering a circular circumlunar orbit with a height of 100 km (in relation to the traditional flight scheme) by more than 140 m/s.

References

1. Parker JS, Anderson RL. *Low-energy lunar trajectory design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118855065>
2. McCarthy BP, Howell KC. Cislunar transfer design exploiting periodic and quasi-periodic orbital structures in the four-body problem. *71st International Astronautical Congress, The CyberSpace Edition, October 12–14, 2020*. Paris; 2020.
3. Scheuerle ST, McCarthy BP, Howell KC. Construction of ballistic lunar transfers leveraging dynamical systems techniques. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Lake Tahoe, California (Virtual), August 9–12, 2020*. South Lake Tahoe, California; 2021.
4. McCarthy BP, Howell KC. Trajectory design using quasi-periodic orbits in the multi-body problem. *Proceedings of the 29th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2019*. Maui; 2019.
5. Ivashkin VV. On the Earth-to-Moon trajectories with temporary capture of a particle by the moon. *54th International Astronautical Congress, Bremen, Germany*,

September 29 – October 3, 2003. Paper IAC-03-A.P.01. <https://doi.org/10.2514/6.IAC-03-A.P.01>

6. Ivashkin VV. Low energy trajectories for the Moon-to-Earth space flight. *Journal of Earth System Science*. 2005;114:613–618. <https://doi.org/10.1007/BF02715945>

7. Belbruno EA, Carrico JP. Calculation of weak stability boundary ballistic lunar transfer trajectories. *Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, August 14–17, 2000, Denver, Colorado*. Paper AIAA 2000-4142. <https://doi.org/10.2514/6.2000-4142>

8. Belbruno EA, Miller JK. Sun-perturbed Earth-to-Moon transfers with ballistic capture. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1993;16(4):770–774. <https://doi.org/10.2514/3.21079>

9. Koon WS, Lo MW, Marsden JE, Ross SD. Low energy transfers to the Moon. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2001;81(1):63–73. <https://doi.org/10.1023/A:1013359120468>

10. Miller JK. Lunar transfer trajectory design and four body problem. *13th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting at Ponce, Puerto Rico, 2003*. American Astronomical Society, American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2003.

11. Miller JK, Hintz GR. Weak stability boundary and trajectory design. *Spaceflight Mechanics*. Conference paper AAS 15-297. Williamsburgh, VA; 2015.

12. Konstantinov MS, Thant AM. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 1. Theory and method. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):7–16. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-7-16>

13. Martins JRRA, Sturdza P, Alonso JJ. The complex-step derivative approximation. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 2003;29(3):245–262. <https://doi.org/10.1145/838250.838251>

14. Konstantinov MS, Nikolichev IA, Thein M. Optimization of low thrust multi-revolution orbital transfer using the method of dual numbers. *Proceedings of the 6th International Conference on Astrodynamics. Tools and Technics (ICATT-2016)*. Available from: <https://indico.esa.int/indico/event/111/session/21/contribution/99/material/paper/0.pdf> (accessed: 12.11.2022).

15. Petukhov VG, Yoon SW. Optimization of perturbed spacecraft trajectories using complex dual numbers. Part 1. Theory and method. *Cosmic Research*. 2021;59(5):401–413. <https://doi.org/10.1134/S0010952521050099>

About the authors

Mikhail S. Konstantinov, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Space Systems and Rocket Science Department, Aerospace Institute, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0138-6190, Scopus Author ID: 55396771600, eLIBRARY SPIN-code: 3030-7494; mkonst@bk.ru

Aung Myo Thant, PhD student, Space Systems and Rocket Science Department, Aerospace Institute, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-1159-3292; aungmyothant4696@gmail.com

Сведения об авторах

Константинов Михаил Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры космических систем и ракетостроения, Аэрокосмический институт, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; ORCID: 0000-0002-0138-6190, Scopus Author ID: 55396771600, eLIBRARY SPIN-код: 3030-7494; mkonst@bk.ru

Тант Аунг Мьо, аспирант, кафедра космических систем и ракетостроения, Аэрокосмический институт, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; ORCID: 0009-0000-1159-3292; aungmyothant4696@gmail.com




DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-121-134
EDN: BVYDIT
УДК 629.782

Научная статья / Research article

Алгоритм поддержки принятия управленческих решений при автономном управлении космическими аппаратами в атмосфере планеты

Д.А. Орлов , С.А. Купреев , О.Е. Самусенко , В.М. Мельников 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 orlov-da@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 января 2023 г.

Доработана: 27 марта 2023 г.

Принята к публикации: 29 марта 2022 г.

Ключевые слова:

база знаний, идентификация полетных ситуаций, нештатная ситуация, принятие решений, бортовая аппаратура

Аннотация. Разработан новый алгоритм принятия автономных решений при управлении космическими аппаратами, осуществляющими спуск в атмосфере, который позволяет осуществить устойчивое управление космическим аппаратом относительно номинальных траекторий полета, что обеспечивает возможность надежного выполнения целевых задач космических миссий. Сформированы аналитические зависимости, с помощью которых можно получить высокоточные расчеты параметров движения космического аппарата в атмосфере и определить корректирующие программы управления аппаратом. Это позволяет реализовать движение космического аппарата в атмосфере по траекториям, близким к оптимальным, даже в условиях значительных воздействий возмущающих факторов на динамику полета аппарата. Дана оценка работоспособности алгоритма принятия автономных решений на примере парирования возмущающих воздействий при спуске космического аппарата в атмосферах Марса и Юпитера. Показано, что при полном качественном совпадении данных, рассчитанных с использованием аналитических зависимостей и результатов численного интегрирования, вычислительные погрешности не превышают 3 %. При наиболее неблагоприятных сочетаниях навигационных ошибок и вариаций плотности атмосферы отработка составленных корректирующих программ управления в большинстве случаев обеспечивает качественное совпадение возмущенных и номинальных траекторий. Разработанный алгоритм принятия автономных решений на основе аналитических зависимостей может быть эффективно применен при движении космического аппарата в атмосферах планет при различных краевых условиях, ограничениях, проектных характеристиках аппарата и моделях атмосферы.

Для цитирования


Орлов Д.А., Купреев С.А., Самусенко О.Е., Мельников В.М. Алгоритм поддержки принятия управленческих решений при автономном управлении космическими аппаратами в атмосфере планеты // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 121–134. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-121-134>



Management decision support algorithm for autonomous spacecraft's control in the planet's atmosphere

Dmitry A. Orlov , Sergei A. Kupreev , Oleg E. Samusenko , Vitaly M. Melnikov 

RUDN University, Moscow, Russian Federation

 orlov-da@rudn.ru

Article history

Received: August 12, 2022

Revised: October 27, 2022

Accepted: October 29, 2022

Keywords:

autonomous control, knowledge base, identification of flight situations, contingency, decision making, onboard equipment

Abstract. A new algorithm for making autonomous decisions when controlling spacecraft carrying out descent in the atmosphere is developed, which allows to carry out stable control of the spacecraft relative to the nominal flight trajectories, which provide to reliably fulfill the targets of space missions. Analytical dependences are formed, with the help of which it is possible to obtain high-precision calculations of the parameters of the movement of a spacecraft in the atmosphere and determine corrective programs for controlling the apparatus. This makes it feasible to implement the movement of a spacecraft in the atmosphere along trajectories close to optimal, even under conditions of significant influence of disturbing factors on the dynamics of the flight of the vehicle. The authors give an estimate of the performance of the algorithm for making autonomous decisions on the example of parrying disturbing influences during the descent of a spacecraft in the atmospheres of Mars and Jupiter. It is shown that with complete qualitative agreement between the data calculated using the analytical dependences and the results of numerical integration, the computational errors do not exceed 3%. With the most unfavorable combinations of navigation errors and atmospheric density variations, the development of the corrective control programs developed in most cases ensures a qualitative coincidence of the disturbed and nominal trajectories. The developed algorithm for making autonomous decisions based on analytical dependencies can be effectively applied when a spacecraft moves in planetary atmospheres under various boundary conditions, constraints, design characteristics of the spacecraft and atmosphere models.

For citation

Orlov DA, Kupreev SA, Samusenko OE, Melnikov VM. Management decision support algorithm for autonomous spacecraft's control in the planet's atmosphere. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):121–134. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-121-134>

Введение

Наиболее сложным этапом осуществления космических экспедиций по изучению планет Солнечной системы является спуск космического аппарата (КА) в их атмосферах. Значительные проблемы при формировании управленческих решений на этом этапе могут возникнуть по следующим причинам:

– неточность знания параметров атмосфер, в первую очередь их плотности, что может привести к существенным отклонениям реальных траекторий движения КА от оптимальных;

– возможные навигационные погрешности, а также неточности проведения коррекций движения КА на этапе межпланетного перелета, определения орбитальных параметров полета аппарата, работы исполнительных органов и др. При этом

параметры входа КА в атмосферу, в первую очередь высота условного перицентра h_{π} , могут существенно отличаться от номинальных;

– невозможность оперативного информационного взаимодействия с наземными станциями, что приводит к необходимости решения задач идентификации полетных ситуаций и выработки управленческих решений бортовыми средствами.

В результате неблагоприятного стечения указанных обстоятельств могут возникнуть нештатные ситуации, приводящие в том числе к срыву программ полета.

Вышеизложенные факторы определяют необходимость выработки автономных управленческих решений по проведению оперативных коррекций траекторий движения КА на атмосфере-

ном участке в условиях жестких временных ограничений.

Формирование аналитических зависимостей компактного вида дает возможность создания высокоэффективных алгоритмов для формирования базовых решающих правил, охватывающих максимально возможные случаи возникающих полетных ситуаций и применяемых для парирования негативных тенденций в практически любых складывающихся условиях.

Синтезу автономных алгоритмов управления КА при спуске в атмосфере Земли посвящены фундаментальные работы [1–5]. Их результаты использовались при создании алгоритмов управления в атмосферах планет. Вместе с тем следует отметить, что применение существующих алгоритмов без соответствующих корректив в большинстве случаев невозможно из-за специфических условий полета в атмосферах планет Солнечной системы.

1. Формирование базовых решающих правил при управлении КА в атмосфере

Математическая модель движения КА описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений в скоростной системе координат с учетом влияния гравитационных, аэродинамических, центробежных и кориолисовых сил в центральном поле тяготения:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= -\frac{\rho V^2 C_x(\alpha) S}{2m} - \\ &- g \sin \theta - \omega^2 r \cos \varphi (\sin \varphi \sin \varepsilon \cos \theta - \\ &- \cos \varphi \sin \theta); \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{\rho V C_y(\alpha) S}{2m} \cos \gamma - \frac{g}{V} \cos \theta + \\ &+ \frac{V}{r} \cos \theta + 2\omega \cos \varphi \cos \varepsilon + \\ &+ \frac{\omega^2 r}{V} \cos \varphi (\sin \varphi \sin \varepsilon \sin \theta + \cos \varphi \cos \theta); \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{\rho V C_y(\alpha) S \sin \gamma}{2m \cos \theta} - \frac{V}{r} \cos \theta \cos \varepsilon \operatorname{tg} \varphi - \\ &- \frac{2\omega}{\cos \theta} (\cos \theta \sin \varphi - \sin \varepsilon \sin \theta \cos \varphi) - \\ &- \frac{\omega^2 r}{V} \sin \varphi \cos \varphi \frac{\cos \varepsilon}{\cos \theta}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dh}{dt} = V \sin \theta;$$

$$r = R + h; \quad g = \frac{\mu}{r^2}; \quad K_G = \frac{C_y(\alpha)}{C_x(\alpha)}; \quad P_x = \frac{m}{C_x(\alpha) S},$$

где V – скорость КА, км/с; θ – угол наклона вектора скорости к местному горизонту, градусы; ε – угол между проекцией вектора скорости на местный горизонт и местной параллелью, градусы; h – высота полета КА над поверхностью планеты, км; λ и φ – геоцентрические долгота и широта, градусы; m – масса КА, кг; R – экваториальный радиус планеты, км; ρ – плотность атмосферы, кг/м³; μ – произведение гравитационной постоянной на массу планеты, км³/сек²; r – радиус-вектор в аэроцентрической экваториальной системе координат, км; P_x – приведенная нагрузка на лобовую поверхность КА, кг/м²; K_G – аэродинамическое качество; γ – угол крена, градусы; α – угол атаки, градусы, ω – угловая скорость вращения планеты; C_x – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления; C_y – аэродинамический коэффициент подъемной силы; g – ускорение свободного падения, м/с²; S – площадь Миделева сечения, м²

Учитывались допущения о малости угла наклона вектора скорости к местному горизонту θ на ограниченных участках траектории движения КА [6–9]:

$$\sin \theta \approx \theta; \quad \cos \theta \approx 1.$$

Кроме того, использовались упрощения исходных систем дифференциальных уравнений, связанные с допущением об экспоненциальном характере изменения плотности атмосферы ρ от высоты h и о преобладании аэродинамической силы F_A над суммой гравитационной, центробежной и кориолисовой сил $F_{гр}$, $F_{ц}$, $F_{к}$ при полете КА в атмосфере [8; 10; 11]:

$$\rho(h) = \rho_0 e^{-\beta h}; \quad F_A \gg F_{гр} + F_{ц} + F_{к}.$$

В качестве исходной рассматривалась система уравнений (1). С учетом указанных преобразований и допущений она переписывается в виде

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{C_x S \rho V^2}{2m};$$

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{dt} &= \frac{C_y S \rho V}{2m} \cos \gamma - \rho V M_1; \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{C_y S \rho V}{2m} \sin \gamma - \rho V M_2; \\ \frac{dh}{dt} &= V\theta,\end{aligned}\quad (2)$$

где M_1 и M_2 – рекуррентные кусочно-постоянные зависимости на конечных интервалах траекторий полета КА [6; 12; 13]:

$$\begin{aligned}M_1 &= \left(\frac{gr}{V^2} - 1 - \frac{\omega^2 r^2}{V^2} - \frac{2\omega r \cos \varepsilon}{V} \right) \frac{1}{\rho r}; \\ M_2 &= \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\cos \varepsilon}{r} + \frac{2\omega}{V} + \frac{\omega^2 r \cos \varepsilon}{V^2} \right).\end{aligned}$$

Очевидно, что для проведения высокоточных ускоренных расчетов использовать систему уравнений (2) можно лишь в условиях достаточно частого уточнения текущих параметров движения КА и при прогнозировании траекторий дальнейшего полета аппарата на ограниченных временных интервалах. Это обеспечивается при условии разработки на основе уравнений (2) рекуррентных соотношений для расчета координат полета КА на конечных интервалах кусочного постоянства рассмотренных выше переменных M_1 и M_2 .

Новизной разрабатываемого метода является переход к независимому аргументу ρ – плотности атмосферы планеты на высоте полета КА. Это обусловлено не только целесообразностью снижения порядка системы дифференциальных уравнений, но и тем, что на основе измерений этого параметра осуществляется идентификация полетных ситуаций КА с последующей выработкой рекомендаций по принятию управленческих решений. Вариация плотности атмосферы оказывает значительное влияние на характер траекторий движения КА. В этих условиях только оперативное парирование таких воздействий позволяет обеспечить эффективное решение задач космических миссий – спуска КА в атмосфере и выведения на спутниковые орбиты планеты.

Эти зависимости с учетом указанных допущений преобразуются в виде

$$M_1 = \left(\frac{gr}{V^2} - 1 \right) \frac{1}{\rho R}; \quad M_2 = \frac{\varphi \cos \varepsilon}{\rho R}.$$

Используемые в этих зависимостях переменные описаны при рассмотрении системы дифференциальных уравнений (1).

После введения замены переменной $dt = -d\rho/V\theta\rho\beta$ получим систему уравнений пятого порядка:

$$\begin{aligned}\frac{dV}{d\rho} &= \frac{C_x S V}{2m\beta\theta}; \\ \frac{d\theta}{d\rho} &= -\frac{1}{\theta\beta} \left(\frac{C_y S}{2m} \cos \gamma - M_1 \right); \\ \frac{d\varepsilon}{d\rho} &= -\frac{1}{\theta\beta} \left(\frac{C_y S}{2m} \sin \gamma - M_2 \right).\end{aligned}\quad (3)$$

Интегрируя второе уравнение системы (3), определим закон изменения угла θ в зависимости от параметра ρ

$$\theta = -\sqrt{A_1\rho - A_2},\quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}A_1 &= \frac{2}{\beta} \left(M_1 - \frac{C_y S}{2m} \cos \gamma \right); \\ A_2 &= \frac{2\rho_0}{\beta} \left(M_1 - \frac{C_y S}{2m} \cos \gamma \right) - \theta_0^2.\end{aligned}$$

Здесь и далее индекс 0 характеризует значения соответствующих переменных в начале интервалов кусочного постоянства вышеуказанных параметров. Для получения закона изменения скорости полета V от величины ρ проинтегрируем первое уравнение системы (4):

$$V = V_0 e^{-C_x S (\theta_0 - \theta) / m\beta A_1}.\quad (5)$$

Зависимость курсового угла ε от плотности атмосферы на высоте полета КА ρ можно получить в результате интегрирования третьего дифференциального уравнения системы (3) с учетом формулы (4):

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - A_1 B_1 (\sqrt{A_1\rho - A_2} - \sqrt{A_1\rho_0 - A_2}).\quad (6)$$

Соотношение между значениями курсового и траекторного углов можно записать следующим образом:

$$\varepsilon = B_1\theta + B_2,$$

где

$$B_1 = -\frac{2}{A_1\beta} \left(\frac{C_y S}{2m} \sin \gamma - M_2 \right);$$

$$B_2 = \varepsilon_0 + \frac{2}{A_1\beta} \left(\frac{C_y S}{2m} \sin \gamma - M_2 \right) \theta_0.$$

Аналитические соотношения (4)–(6) позволяют определить траекторные параметры пространственного движения КА в атмосфере при известных начальных условиях, весовых и проектно-баллистических характеристиках аппарата и параметров атмосферы.

На интервалах кусочного постоянства функций M_1 и M_2 и параметров A_1 , A_2 , B_1 , B_2 начальные значения скорости V , траекторного и курсового углов θ и ε , конечные величины соответствующих параметров на предыдущем $(j - 1)$ -м интервале определяются

$$\theta_j(\rho) = -\sqrt{A_1\rho_j - A_2(\theta_{j-1})};$$

$$V_j(\rho) = V_{j-1} e^{-c_x S(\theta_{j-1} - \theta_j) / m\beta A_1};$$

$$\varepsilon_j(\rho) = B_1\theta_j + B_2(\theta_{j-1}).$$

Для составления базовых решающих правил, выступающих основой формирования управленческих решений в условиях неопределенности полета КА, использовались разработанные аналитические зависимости траекторных координат от плотности атмосферы, то есть от параметра, являющегося определяющим источником возмущающих влияний на динамику движения аппарата. Такое структурное построение расчетных соотношений позволяет разработать формулы для определения параметров корректирующих управляющих воздействий в зависимости от текущих (в том числе и от возмущенных) положений КА.

Анализ зависимостей (4), (5) показывает, что управляющие функции U , влияющие на характер движения КА в продольной плоскости, содержатся в явном виде в дифференциальном уравнении для расчета траекторного угла θ , а влияющие на боковое маневрирование аппарата – в уравнении для определения курсового угла ε . Это дает возможность формирования решающих

правил в виде аналитических зависимостей типа $U_j = f(\xi_i, S_i, S_{i+1})$ [14] на основе соотношений (4) и (5).

Преобразуем уравнение для вычисления траекторного угла θ в зависимости от плотности атмосферы ρ к виду

$$\theta^2 = \theta_0^2 + \frac{2}{\beta} \left(\frac{C_y S}{2m} \cos \gamma - M_1 \right) (\rho_0 - \rho).$$

В результате формулу для определения управляющих воздействий аэродинамическими силами $U = (C_y \cos \gamma)$ на интервалах кусочного постоянства запишем следующим образом:

$$U = (C_y \cos \gamma) = \frac{2mM_1}{S} + \frac{2m\beta(\theta_{i+1}^2 - \theta_i^2)}{S(\rho_i - \rho_{i+1})}.$$

Анализ данной зависимости позволяет оценить качественный характер влияния возможных отклонений плотности атмосферы от заранее прогнозируемых значений $\delta\rho$ на корректирующие управляющие воздействия U . Нетрудно видеть, что возрастание плотности ρ_i приводит к необходимости увеличения управляющей функции U на траекториях снижения КА в атмосфере, то есть при $|\theta_{i+1}| > |\theta_i|$, и к уменьшению U на участках рикошета траектории полета, где высота движения аппарата возрастает и соблюдается неравенство $|\theta_{i+1}| < |\theta_i|$. Причем изменение величины U может быть достигнуто за счет варьирования как угла крена γ , так и угла атаки α , влияющего на аэродинамический коэффициент подъемной силы $C_y(\alpha)$, а следовательно, и на величину аэродинамического качества.

Для составления функциональной зависимости вариаций управляющей функции δU от отклонений плотности атмосферы $\delta\rho$ воспользуемся формулой

$$\frac{\delta U}{\delta\rho} \approx \frac{\partial U}{\partial\rho} = \frac{2m\beta(\theta_{i+1}^2 - \theta_i^2)}{S(\rho_i - \rho_{i+1})^2}.$$

Окончательная зависимость для расчета δU будет иметь вид

$$\delta U = \frac{2m\beta(\theta_{i+1}^2 - \theta_i^2)}{S(\rho_i - \rho_{i+1})^2} \delta\rho. \quad (7)$$

Итак, с помощью представленного соотношения (7) могут быть определены корректирующие программы управления КА в зависимости от возможных отклонений плотности атмосферы $\delta\rho$ от заранее прогнозируемых значений. Как видно, для одинаковых отклонений $\delta\rho$ величины δU будут больше при полете КА на меньших высотах, то есть в условиях повышенной плотности атмосферы, а также при большей крутизне траекторий полета аппарата.

Для составления зависимости между управляющими воздействиями U и параметрами движения КА в боковом направлении воспользуемся соотношением (6). После его преобразования получим формулу

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{2\sqrt{A_1}}{\beta} \left(\frac{C_y S}{2m} \sin \gamma - M_2 \right) \times \left(\sqrt{\rho - \frac{A_2}{A_1}} - \sqrt{\rho_0 - \frac{A_2}{A_1}} \right). \quad (8)$$

Как и в рассмотренном выше случае коррекции траекторных углов полета КА в моменты времени t_i измеряются значения плотности атмосферы ρ_i и перегрузки n_{xi} . С учетом этих значений рассчитывается скорость движения КА V_i :

$$V_i = \sqrt{\frac{2mgn_{xi}}{C_x S \rho_i}}.$$

Зная скорость V_i при $t = t_i$ и параметры φ_{i-1} и ε_{i-1} в моменты предыдущих измерений t_{i-1} , определим уточненные значения широты подспутниковой точки КА $\varphi_i(t_i)$ и коэффициента $M_2(t_i)$, входящих в формулу (9):

$$\varphi_i = \varphi_{i-1} + \frac{V_i}{R} \sin \varepsilon_{i-1};$$

$$M_2(t_i) = \frac{\varphi_i \cos \varepsilon_{i-1}}{\rho_i R}.$$

По формуле (8) определяется текущая величина курсового угла ε_i , которая сравнивается с прогнозируемым номинальным значением ε_{ni} на оптимальных траекториях полета, соответствующим

измеренным значениям плотности атмосферы ρ_i . Отклонения значений ε_i от ε_{ni} компенсируются за счет реализации в момент времени t_i корректирующей программы управления $U = (C_y \sin \gamma)$, определяемой на основе зависимостей (8):

$$U = C_y \sin \gamma (t_i) = \frac{2mM_2}{S} + \frac{m\beta(\varepsilon_{ni} - \varepsilon_i)}{S\sqrt{A_1}(\sqrt{\rho_i - A_2/A_1} - \sqrt{\rho_{i-1} - A_2/A_1})}. \quad (9)$$

Анализ данного уравнения показывает, что фактором, в наибольшей степени определяющим значения U , является различие между текущими и прогнозируемыми значениями курсовых углов траектории движения КА ε_i и ε_{ni} . Эти углы, в свою очередь, существенно влияют на значения боковой дальности спуска аппарата в атмосфере L_6 . Следовательно, требования к точности вычисления корректирующих функций $U = C_y \sin \gamma$ в значительной мере определяются допустимыми погрешностями в определении дальности L_6 . Учитывая, что приоритетные задачи планируемых программ исследования дальнего космоса не связаны с обеспечением высокоточной посадки КА в области достаточно малых размеров на поверхности планет назначения (существующие технические требования к проведению экспедиций дальнего космоса определяют необходимость выполнения спуска аппаратов в некоторые укрупненные районы без жесткой привязки к конкретным географическим координатам точки посадки на поверхности планеты), приемлемое управление спускаемыми аппаратами в боковом направлении может быть обеспечено при реализации корректирующих воздействий, рассчитываемых в соответствии с зависимостью (9).

Итак, с использованием уравнения (9) можно определить необходимые корректирующие воздействия на динамику полета КА в боковом направлении на основе измерений плотности атмосферы и перегрузки в зависимости от отклонений параметров реальных траекторий от номинальных.

С помощью соотношений (4)–(9) можно выполнить оперативное нахождение корректирующих программ управления КА и реализовать движение КА в атмосфере по траекториям,

близким к оптимальным, даже в условиях значительных воздействий возмущающих факторов на динамику полета аппарата.

2. Алгоритм поддержки принятия управленческих решений при спуске КА в атмосферах планет

На основе преобразования данных в процессе диагностики полетных ситуаций осуществляется автономная выработка управляющих воздействий на КА. Этот этап является наиболее сложным при формировании алгоритмов управления. Существующие аналоги способов выработки управленческих решений в основном базируются на применении заранее установленных соотношений между параметрами идентифицируемого состояния КА и командными воздействиями.

Вместе с тем могут возникать такие полетные ситуации, при которых практически невозможно заранее сформулировать необходимые логические соотношения. Например, при входе в атмосферу планеты условия полета КА могут отличаться от номинальных в достаточно широких пределах по значительному числу параметров: крутизне траектории, скорости полета, нарастающую перегрузку, плотности атмосферы и т. д.

Вышеизложенные факторы предопределяют необходимость выработки автономных управленческих решений при полете КА на атмосферном участке в условиях жестких временных ограничений [15–20]. Следует отметить, что основная сложность решения этой задачи в необходимости определения управляющих корректирующих воздействий на основе анализа нелинейных систем дифференциальных уравнений, не имеющих аналитических решений.

Опишем основные этапы процесса выработки и принятия управленческих решений.

Этап 1. Основным целевым назначением блока идентификации полетных ситуаций является оценка уровня совпадения параметров реальных траекторий движения КА с соответствующими параметрами номинальной траектории. Отметим, что наиболее важным параметром, определяющим основной признак сравнения качественного характера реального и номинального движения КА, является угол наклона вектора скорости к местному горизонту (траекторный угол) θ . Значительные отклонения этого параметра могут свидетельствовать о чрезмерном изменении кру-

тизны траектории полета КА и о возможных нарушениях целей космических миссий (вылет КА из атмосферы вместо посадки спускаемого аппарата на поверхность планеты, превышение максимальных перегрузок и температур сверх допустимых значений). Для расчета параметров реального движения КА измерительными средствами блока, в частности датчиками измерения плотности атмосферы, с достаточно малыми интервалами времени $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ определяются значения плотности атмосферы ρ_i на различных высотах полета КА h_i .

На основании измеренных значений плотности атмосферы ρ_i рассчитываются значения траекторного угла $\theta_{\rho i}$ на реальных траекториях движения КА.

В результате формируется массив значений $\theta_{\rho i}$, соответствующих плотностям атмосферы ρ_i , измеренным в моменты времени t_i на различных высотах h_i . Путем сравнения расчетных величин $\theta_{\rho i}$ с номинальными θ_{ni} для каждого момента измерений t_i делается вывод о необходимости (или ее отсутствии) проведения коррекций траекторий движения КА. Причем рекомендации по их проведению даются при устойчивом нарастающем характере отклонения значений $\theta_{\rho i}$ относительно θ_{ni} :

$$\delta\theta_i(t_i, h_i) = \theta_{\rho i}(t_i, h_i) - \theta_{ni}(t_i, h_i).$$

Таким образом, необходимо проведение коррекций при наступлении следующих формализованных событий для каждого момента измерений t_i :

$$S_1: \delta\theta_i(t_i, h_i) > 0 \wedge \delta\theta_{i+1}(t_{i+1}, h_{i+1}) > \delta\theta_i(t_i, h_i);$$

$$S_2: \delta\theta_i(t_i, h_i) < 0 \wedge \delta\theta_{i+1}(t_{i+1}, h_{i+1}) < \delta\theta_i(t_i, h_i).$$

В случаях невыполнения указанных условий или при их выполнении не для всех моментов измерений решение о проведении коррекций движения КА переносится до наступления событий S_1 или S_2 . При этом событие S_1 соответствует необходимости проведения коррекций, предусматривающих снижение аэродинамического качества, то есть либо увеличение угла крена γ , либо отклонение угла атаки α от положения, соответствующего максимальному значению аэродинамического коэффициента подъемной силы. При наступлении события S_2 необходимо увеличивать аэродинамическое качество КА.

Итак, с помощью проведения измерений бортовыми средствами блока идентификации полетных ситуаций устанавливается необходимость проведения оперативных коррекций траекторий движения КА в атмосфере путем изменения аэродинамического качества.

Этап 2. После выявления признаков отклонения реальных траекторий движения КА от прогнозируемых на средства машины логических заключений выдается формализованная информация о наступлении событий S_1 или S_2 , на основании которых определяются параметры корректирующей программы управления КА.

При полете КА по более пологим траекториям, по сравнению с номинальными, то есть при возникновении угрозы несанкционированного вылета спускаемого аппарата из атмосферы (событие S_1), целесообразно применять программу постепенного уменьшения аэродинамического качества с непрерывным контролем изменения крутизны траектории. При резком снижении аэродинамического качества до нулевого или отрицательного значений может наступить процесс интенсивного уменьшения высоты полета, что приведет к возрастанию максимальных перегрузок и температур, действующих на КА, сверх допустимых значений.

В случаях наступления события S_2 целесообразно, как можно быстрее, переводить КА на режим полета с нулевым углом крена, то есть с максимально возможным значением эффективного аэродинамического качества на заданном балансировочном угле атаки α . При этом угол α следует выбирать из условия сокращения разницы между траекторными углами θ для реальной и номинальной траекторий.

Информация о расчетных значениях отклонений углов $\delta\theta$ поступает из машины логических заключений в базу знаний, где вырабатываются решающие правила для коррекции движения КА, после чего сформированная программа управления вновь поступает на средства машины логических заключений.

Формальная запись базовых решающих правил, определяющих программу изменения аэродинамического качества, составленную на основе разработанной зависимости (8), имеет следующий вид:

$$\text{если } S_1 \wedge S_2, \text{ то } \delta(C_y \cos \gamma) = \frac{2m\beta(\theta_{pi}^2 - \theta_{ni}^2)}{S(\rho_{pi} - \rho_{ni})}.$$

Из рассмотрения представленного правила нетрудно увидеть, что при положительных отклонениях значений угла наклона вектора скорости к местному горизонту $\delta\theta$, следовательно, при снижении плотности атмосферы, корректирующие значения аэродинамического качества снижаются, а при отрицательных – увеличиваются.

Для окончательного принятия решения о целесообразности реализации рекомендуемой корректирующей программы управления информация о сформированных решающих правилах передается на блок моделирования и прогнозирования параметров движения КА для проверки корректности разработанной программы.

Этап 3. Эффективность проведения коррекций движения КА при спуске на аэродинамическом участке во многом определяется частотой измерений плотности атмосферы планеты, последующих расчетов траекторных углов полета и формирования программ управления. Наряду с перечисленным важным фактором обеспечения надежности реализации корректирующих воздействий является проверка правильности рекомендуемых управленческих решений путем прогнозирования участков полета КА после исполнения программ управления.

Средствами блока моделирования и прогнозирования после каждого обновления корректирующих программ проводится прогнозирование последующих участков полета КА. При этом считается, что корректирующая программа составлена правильно, если после ее реализации обеспечивается уменьшение отклонений между траекторными углами $\delta\theta$. В противных случаях в программу управления вносятся итерационные поправки по изменению углов крена и/или атаки для снижения отклонений $\delta\theta$.

Несмотря на возможный итерационный характер вычислительного процесса, расчет прогнозируемых параметров движения КА обеспечивается на высоком уровне оперативности. Это достигается, во-первых, за счет использования аналитических зависимостей компактного вида и, во-вторых, из-за прогнозирования только начального этапа траекторий полета после проведения коррекции. По результатам расчетов делается вывод о характере эволюции отклонений $\delta\theta$. После выполнения условий об установлении факта сокращения расхождений между расчетными и номинальными значениями траекторных углов принимаются решения об исполнении разработанных программ управления аэродинамическим качеством. Такой процесс поддержки принятия и реализации управ-

ленческих решений продолжается в течение всего полета КА на атмосферном участке до момента посадки на поверхность планеты.

На рис. 1 представлена схема функционирования системы управления в процессе принятия решений при управлении КА в атмосфере.

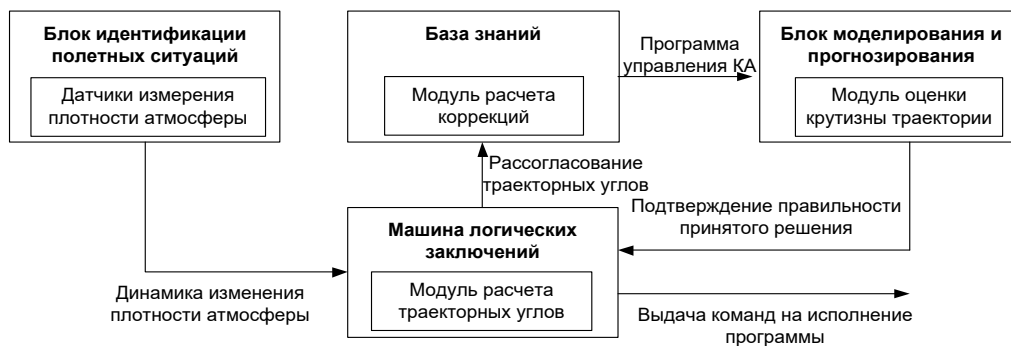


Рис. 1. Схема функционирования системы управления при спуске КА в атмосфере

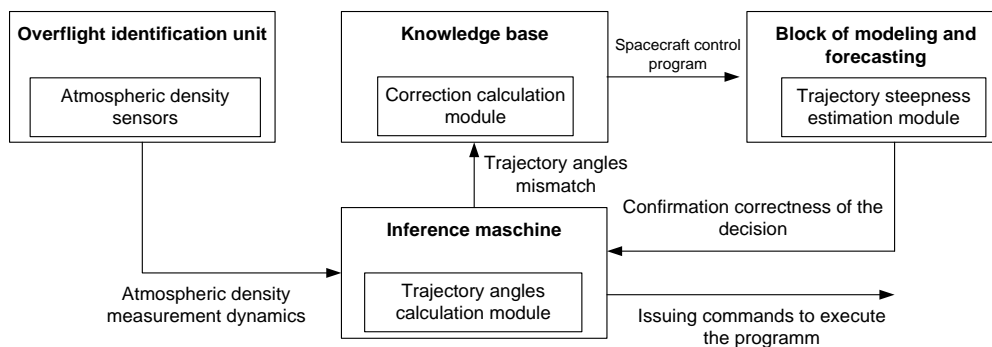


Figure 1. Diagram of the operation of the control system during the spacecraft descent in the atmosphere

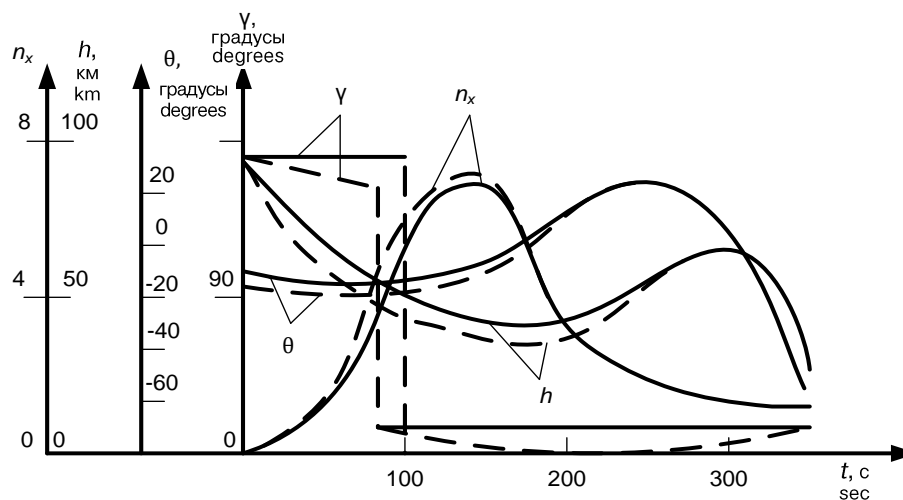


Рис. 2. Изменение высоты h , траекторного угла θ , перегрузки n_x и угла крена γ при использовании алгоритма управления КА в атмосфере Марса: $V_0 = 60$ км/с; $\theta_0 = -10^\circ$; $K_6 = 0,5$; $P_x = 500$ кг/м²; сплошные линии – номинальная траектория; штриховые линии – возмущенная траектория
 Figure 2. Change altitude h , trajectory angle θ , overload n_x and roll angle γ when using the spacecraft control algorithm in the Martian atmosphere: $V_0 = 60$ km/s; $\theta_0 = -10^\circ$; $K_6 = 0,5$; $P_x = 500$ kg/m²; solid lines – nominal trajectory; dashed lines – perturbed trajectory

Для оценки работоспособности алгоритма управления приведены наиболее характерные примеры парирования возмущающих воздействий при спуске КА в атмосферах Марса и Юпитера. На рис. 2 представлены зависимости высоты полета h , угла наклона вектора скорости к местному горизонту θ , управляющего угла крена γ , перегрузки n_x от времени спуска t для номинальной и возмущенной траекторий спуска КА в атмосфере Марса.

При проведении расчетов возмущенной траектории угол входа КА в атмосферу определялся с помощью датчика случайных величин с использованием нормального закона распределения параметра θ_0 при математическом ожидании, равном номинальному значению $\theta_{H0} = -10^\circ$, и диспер-

сии, соответствующей величине навигационного коридора входа $\Delta h_{\text{п}}^{\text{HAB}} = \pm 20$ км [6; 20]. Так, для представленной на рис. 3 возмущающей траектории $\theta_{B0} = -10,6^\circ$. Для определения номинальных траекторий в случаях положительных отклонений абсолютных значений $\delta|\theta_0| = |\theta_{B0}| - |\theta_{H0}|$ использовалась минимальная модель плотности атмосферы Марса (θ_{B0} – угол входа в атмосферу при возмущенной траектории, θ_{H0} – угол входа в атмосферу при номинальной траектории), а при расчете возмущенных траекторий – максимальная модель. В случаях $\delta|\theta_0| < 0$ номинальные траектории рассчитывались для максимальной модели, а возмущенные – для минимальной.

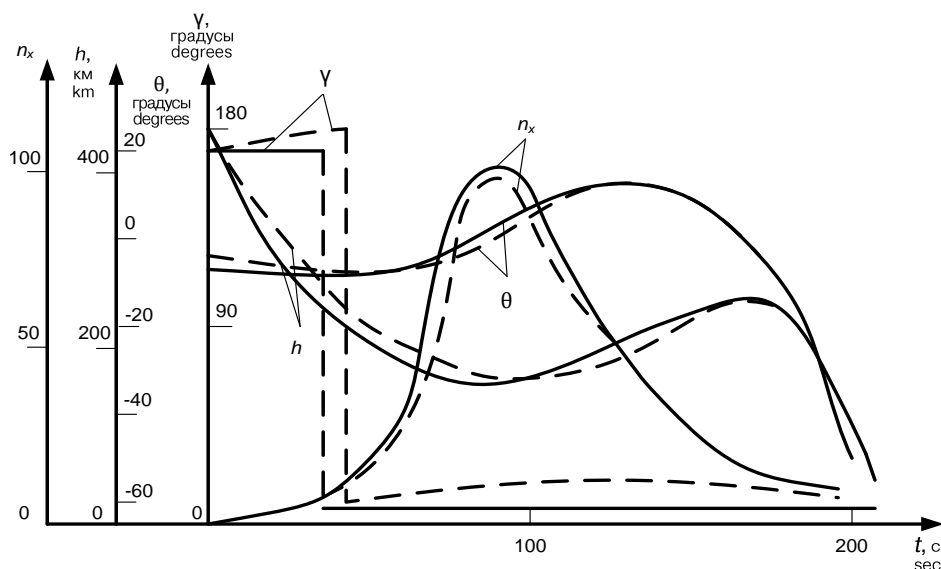


Рис. 3. Изменение высоты h , траекторного угла θ , перегрузки n_x и угла крена γ при использовании алгоритма управления КА в атмосфере Юпитера:

$V_0 = 60$ км/с; $\theta_0 = -6,5^\circ$; $K_6 = 0,6$; $P_x = 200$ кг/м²; сплошные линии – номинальная траектория; штриховые линии – возмущенная траектория

Figure 3. Change altitude h , trajectory angle θ , overload n_x and roll angle γ when using the spacecraft control algorithm in the atmosphere of Jupiter:

$V_0 = 60$ km/s; $\theta_0 = -6.5^\circ$; $K_6 = 0.6$; $P_x = 200$ kg/m²; solid lines – nominal trajectory; dashed lines – perturbed trajectory

Из рассмотрения представленных зависимостей видно, что для компенсации достаточно большого рассогласования траекторных углов, достигающего $\sim 1^\circ$ к 85-й секунде движения КА в атмосфере, осуществляется уменьшение значения угла крена γ . Так, от входа КА в атмосферу до 85-й секунды полета угол γ снижается от $\gamma_0 = 165^\circ$ до $\gamma = 147^\circ$. С этой же целью отрабатывается более раннее переключение аэродинамического качества на положительное значение. Учитывая малую плотность атмосферы на начальном участке полета и значительные отклонения

углов θ от номинальных, реализуемая программа управления позволяет лишь замедлить темп роста рассогласования траекторных углов: к моменту переключения угла γ величина $\delta\theta$ снижается лишь до $0,9^\circ$. На этом участке спуска перегрузка, действующая на КА, примерно на 2–3 единицы больше, чем на номинальной траектории.

Существенное сближение траекторий наступает после того, как эффективное аэродинамическое качество принимает положительное значение и происходит плавное снижение угла крена γ от 15° до нуля. Так, к моменту рикошета

траектории аппарата отклонение $\delta\theta$ уменьшается до $0,3^\circ$, а к 210-й секунде полета в атмосфере – до $0,08^\circ$. В дальнейшем для предотвращения роста углов θ относительно номинальных значений обрабатывается увеличение угла γ от 15° . Следует отметить, что максимальная перегрузка n_{\max} на возмущенной траектории незначительно (примерно на 1,5 единицы) превышает расчетное номинальное значение.

На рис. 3 приведены результаты расчетов параметров спуска КА в атмосфере Юпитера на номинальной и возмущенной траекториях: высоты h , углов θ и γ , перегрузки n . Как и при расчете номинальной траектории полета КА в атмосфере Марса, рассматривалась программа однократного переключения угла крена γ с 165° на 15° . Отклонение угла входа КА в атмосферу на возмущенной траектории от номинального значения определялось с учетом нормального закона распределения параметра θ_0 внутри навигационного коридора входа по высоте условного перигентра, равного $\Delta h_{\text{пр}}^{\text{нав}} = \pm 550$ км [6]. При расчете номинальной траектории использовалась средняя (номинальная) модель плотности атмосферы Юпитера, а при моделировании возмущенной траектории применялась либо максимальная модель (при большей крутизне траектории входа), либо минимальная (при меньшей крутизне). Это соответствует наименее благоприятному сочетанию навигационных ошибок и вариаций плотности атмосферы с точки зрения увеличения максимальных перегрузок и температур в первом случае и возможности несанкционированного вылета из атмосферы – во втором.

Для приведенного варианта расчета возмущенной траектории угол входа КА в атмосферу составляет $\theta_{\text{в0}} = -5,9^\circ$ (для номинальной траектории $\theta_{\text{н0}} = -6,5^\circ$), что соответствует выбору минимальной модели.

В связи с чрезвычайно высокой скоростью движения КА и сравнительно малой плотностью атмосферы на начальном участке полета отличие крутизны номинальной и возмущенной траекторий сначала увеличивается. Так, если в момент входа КА в атмосферу отклонение $\delta\theta$ составляет $0,6^\circ$, то к 25-й секунде полета оно возрастает до $0,85^\circ$. При этом управляющий угол γ монотонно увеличивается, достигнув своего максимума $\gamma = \pi$ к 40-й секунде полета. Применение такой корректирующей программы позволяет лишь замедлить темп роста рассогласования $\delta\theta$.

Другим фактором замедления роста $\delta\theta$ является более позднее переключение (примерно на 7 секунд) эффективного аэродинамического качества на положительное значение. После реализации переключения углы θ на возмущенной траектории начинают приближаться к своим номинальным значениям: отклонение $\delta\theta$ через 8 секунд после момента переключения уменьшается до $0,25^\circ$. Для дальнейшего снижения величины $\delta\theta$ управляющий угол γ возрастает, достигая к 100-й секунде своего локального максимума, равного 22° . Использование такой программы управления уже к 115-й секунде полета КА в атмосфере обеспечивает качественное совпадение возмущенной и номинальной траекторий с отклонениями $\delta\theta$, не превышающими $0,05^\circ$. В связи с этим угол γ снижается до своего номинального значения $\gamma = 15^\circ$. Как и следовало ожидать, в связи с меньшей крутизной начального участка возмущенной траектории полета максимальная перегрузка несколько меньше (\sim на 10 единиц) соответствующего значения для номинальной траектории.

Таким образом, проведенные расчеты, часть из которых представлена на рис. 2 и 3, показали высокую эффективность применения алгоритма управления эффективным аэродинамическим качеством при спуске КА в атмосферах Марса и Юпитера. Даже при наиболее неблагоприятных сочетаниях навигационных ошибок и вариаций плотности атмосферы обработка составленных корректирующих программ управления в большинстве случаев обеспечивает качественное совпадение возмущенных и номинальных траекторий. Разработанные алгоритмы могут быть эффективно применены при движении КА в атмосферах планет при различных краевых условиях, ограничениях, проектных характеристиках аппарата и моделях атмосферы.

Разработанный алгоритм поддержки принятия автономных управленческих решений позволяет осуществить устойчивое управление КА относительно номинальных траекторий полета, что обеспечивает возможность надежного выполнения целевых задач космических миссий. Алгоритм может быть эффективно применен при движении КА в атмосферах планет в широком диапазоне изменения краевых условий, ограничений, проектных характеристик аппарата и атмосферы.

Заключение

С использованием базовых правил рассчитываются корректирующие воздействия при управлении КА в продольной плоскости полета. Разработан алгоритм поддержки принятия управленческих решений при спуске КА в атмосфере планет. Представлены описания процесса взаимодействия отдельных блоков системы автономного управления при идентификации полетных ситуаций, формировании корректирующих программ, проверке корректности принятия рекомендуемых решений.

Сформированы аналитические зависимости для расчета траекторий движения КА на атмосферном участке полета. В основу расчета параметров движения КА в атмосфере положен алгоритм преобразования исходной системы дифференциальных уравнений, где в качестве независимого аргумента используется плотность атмосферы на высоте полета КА. Такое преобразование обусловлено тем, что с помощью измерений этого параметра может осуществляться идентификация полетных ситуаций с последующей выработкой рекомендаций по принятию управленческих решений. Показано, что при полном качественном совпадении данных, рассчитанных с использованием аналитических зависимостей и результатов численного интегрирования, вычислительные погрешности не превышают 3 %.

Заложенные в систему возможности прогнозирования различных динамических режимов полета КА дают возможность принятия оперативных управленческих решений, в том числе в условиях быстро меняющихся ситуаций с КА и в условиях неопределенности. К элементам научной новизны следует отнести структурное построение системы, нацеленность многоэтапного процесса формирования логических заключений на достижение задаваемых целей управления, составление решающих правил в виде аналитических зависимостей от текущего состояния КА, а также возможность автоматизированной идентификации вновь возникающих нестандартных ситуаций и последующего накопления базы знаний. Разработанный алгоритм может найти широкое применение при проектировании перспективных миссий ближнего и дальнего космоса.

Список литературы

1. *Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г.* Алгоритм управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. М.: Наука, 1975. 400 с.
2. *Охоцимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г.* Основы механики космического полета. М.: Наука, 1990. 448 с.
3. *Аношин Ю.М., Бобылев А.В., Ярошевский А.Я.* Управление траекторией космического аппарата с малым аэродинамическим качеством при спуске в атмосфере // Ученые записки ЦАГИ. 2012. Т. XLIII. № 5. С. 79–92.
4. *Omar S., Bevilacqua R.* Guidance, navigation, and control solutions for spacecraft re-entry point targeting using aerodynamic drag // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 155. Pp. 389–405. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.10.016>
5. *Sanyal A., Holguin L., Viswanathan S.P.* Guidance and control for spacecraft autonomous chasing and close proximity maneuvers // *IFAC Proceedings Volumes*. 2012. Vol. 45. Issue 13. Pp. 753–758. <https://doi.org/10.3182/20120620-3-DK-2025.00068>
6. *Иванов Н.М., Мартынов А.И.* Движение космических летательных аппаратов в атмосферах планет. М.: Наука, 1985. 384 с.
7. *Ярошевский В.А.* Приближенный расчет траекторий входа в атмосферу // *Космические исследования*. 1964. Т. 2. № 4. С. 15–21.
8. *Чепмен Д.Р.* Приближенный аналитический метод исследования входа тел в атмосферы планет. М.: Иностранная литература, 1962. 298 с.
9. *Соколов Н.Л., Живоглазов Е.Г.* Приближенный аналитический метод расчета траекторий движения КА в атмосфере с работающей двигательной установкой // *Космические исследования*. 1989. Т. 27. № 4. С. 520–527.
10. *Иванов Н.М., Мартынов А.И.* Управление движением космического аппарата в атмосфере Марса. М.: Наука, 1977. 415 с.
11. *Шкадов Л.М., Буханова Р.С., Илларионов В.Ф., Плохих В.П.* Механика оптимального пространственного движения летательных аппаратов в атмосфере. М.: Машиностроение, 1972. 244 с.
12. *Соколов Н.Л.* Приближенный аналитический метод расчета пространственных маневров космического аппарата в атмосфере // *Космические исследования*. 1988. Т. 26. № 2. С. 209.
13. *Соколов Н.Л.* Исследование оптимального двухпараметрического управления при движении КА в атмосфере // *Космические исследования*. 1989. Т. 26. № 1. С. 64–70.
14. *Орлов Д.А., Купреев С.А., Самусенко О.Е., Мельников В.М., Буркова И.В.* Методический подход к решению проблемы автономного парирования нестандартных ситуаций при управлении космическим аппаратом // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2023.

Т. 24. № 1. С. 17–29. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-17-29>

15. Lagona E., Hilton S., Afful A., Gardi A., Sabatini R. Autonomous trajectory optimisation for intelligent satellite systems and space traffic management // *Acta Astronautica*. 2022. Vol. 194. Pp. 185–201. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.01.027>

16. LaVallee D.B., Jacobsohn J., Olsen C., Reilly J. Intelligent control for spacecraft autonomy – an industry survey // *Space 2006*. Session: EX-1: Automation Technologies. San Jose, California, 19–21 September 2006. <https://doi.org/10.2514/6.2006-7384>

17. Hao Z., Ashith Shyam R.B., Rathinam A., Gao Y. Intelligent spacecraft visual GNC architecture with the state-of-the-art AI components for on-orbit manipulation // *Frontiers in Robotics and AI*. 2021. Vol. 8. Article 639327. <http://doi.org/10.3389/frobt.2021.639327>

18. Pavlov A.N., Kovtun V.S. Cognitive-synergetic approach to the design of automated spacecraft with onboard systems with variability properties // *Proceedings of Models and Methods for Researching Information Systems in Transport 2020* (St. Petersburg, 11–12 December 2020). 2021. Vol. 2803. Pp. 76–83. <https://doi.org/10.24412/1613-0073-2803-76-83>

19. Bieliakov R.O., Radzivilov H.D., Fesenko O.D., Vasylenko V.V., Tsurian O.G., Shyshatskiy A.V., Romanenko V.P. Method of the intelligent system construction of automatic control of unmanned aircraft apparatus // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2019. No. 1. Pp. 218–229.

20. Венцель Е.С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 407 с.

References

1. Okhotsimskiy DE, Golubev YuF, Sykharulidze YuG. *Algorithm of control of the spacecraft during reentry into the atmosphere*. Moscow: Nauka Publ.; 1975. (In Russ.)

2. Okhotsimskiy DE, Sykharulidze YuG. *Fundamentals of space flight mechanics*. Moscow: Nauka Publ.; 1990. (In Russ.)

3. Anoshyn YuM, Bobylev AV, Yaroshevsky AY. Trajectory control of a spacecraft with low aerodynamic quality during descent into the atmosphere. *Uchenye Zapiski TsAGI*. 2012;XLIII(5):79–92. (In Russ.)

4. Omar S, Bevilacqua R. Guidance, navigation, and control solutions for spacecraft re-entry point targeting using aerodynamic drag. *Acta Astronautica*. 2019;155:389–405. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.10.016>

5. Sanyal A, Holguin L, Viswanathan SP. Guidance and control for spacecraft autonomous chasing and close proximity maneuvers. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012;45(13):753–758. <https://doi.org/10.3182/20120620-3-DK-2025.00068>

6. Ivanov NM, Martynov AI. *Movement of spacecraft in the atmospheres of the planets*. Moscow: Nauka Publ.; 1985. (In Russ.)

7. Yaroshevsky VA. Approximate calculation of trajectories of entry into the atmosphere. *Kosmicheskie Issledovaniya*. 1964;2(4):15–21. (In Russ.)

8. Chapman DR. *An approximate analytical method of studying the entry of bodies into the atmospheres of planets*. Moscow: Inostrannaya Literatura Publ.; 1962. (In Russ.)

9. Sokolov NL, Zhivoglavov EG. An approximate analytical method for calculating trajectories of spacecraft motion in the atmosphere with a working propulsion system. *Kosmicheskie Issledovaniya*. 1989;27(4):520–527. (In Russ.)

10. Ivanov NM, Martynov AI. *Control of the movement of the spacecraft in the atmosphere of Mars*. Moscow: Nauka Publ.; 1977. (In Russ.)

11. Shkadov LM, Bukhanova RS, Illarionov VF, Plokhikh VP. *Mechanics of optimal spatial movement of aircraft in the atmosphere*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1972. (In Russ.)

12. Sokolov NL. An approximate analytical method for calculating spatial maneuvers of a spacecraft in the atmosphere. *Space Studies*. 1988;26(2):209. (In Russ.)

13. Sokolov NL. Investigation of the optimal two-parameter control during spacecraft movement in the atmosphere. *Kosmicheskie Issledovaniya*. 1989;26(1):64–70. (In Russ.)

14. Orlov DA, Kupreev SA, Samusenko OE, Melnikov VM, Burkova IV. A methodical approach to solving the problem of autonomous parrying of contingencies situations in spacecraft control. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):17–29. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-17-29>

15. Lagona E, Hilton S, Afful A, Gardi A, Sabatini R. Autonomous trajectory optimization for intelligent satellite systems and space traffic management. *Acta Astronautica*. 2022;194:185–201. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.01.027>

16. LaVallee DB, Jacobsohn J, Olsen C, Reilly J. Intelligent control for spacecraft autonomy – an industry survey. *Space 2006. Session: EX-1: Automation Technologies*. San Jose, California, 19–21 September 2006. <https://doi.org/10.2514/6.2006-7384>

17. Hao Z, Ashith Shyam RB, Rathinam A, Gao Y. Intelligent spacecraft visual GNC architecture with the state-of-the-art AI components for on-orbit manipulation. *Frontiers in Robotics and AI*. 2021;8:639327. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.639327>

18. Pavlov AN, Kovtun VS. Cognitive-synergetic approach to the design of automated spacecraft with onboard systems with variability properties // *Proceedings of Models and Methods for Researching Information Sys-*

tems in Transport 2020 (St. Petersburg, 11–12 December 2020). 2021;2803:76–83. <https://doi.org/10.24412/1613-0073-2803-76-83>

19. Bieliakov RO, Radzivilov HD, Fesenko OD, Vasylichenko VV, Tsaturian OG, Shyshatskiy AV, Romanenko VP.

Method of the intelligent system construction of automatic control of unmanned aircraft apparatus. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2019;(1):218–229.

20. Wenzel ES. *Operations research*. Moscow: Sovetskoye Radio Publ.; 1972. (In Russ.)

Сведения об авторах

Орлов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент департамента механики и процессов управления, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-2733-4479, Scopus Author ID: 57193905914, eLIBRARY SPIN-код: 5313-6772; orlov-da@rudn.ru

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

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

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

About the authors

Dmitry A. Orlov, Ph.D of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2733-4479, Scopus Author ID: 57193905914, eLIBRARY SPIN-code: 57193905914; orlov-da@rudn.ru

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

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

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



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-135-143

EDN: AQTХРТ

УДК 621.165.536.2462-135

Научная статья / Research article

Влияние отклонений параметров в процессе пуска на термонапряженное состояние оборудования ТЭС

Ю.А. Радин^{a,b}, Т.С. Конторович^a, В.У. Мнацаканян^c

^aПАО «Мосэнерго», Москва, Российская Федерация

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

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

✉ RadinYA@mosenrgo.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 29 ноября 2022 г.

Доработана: 17 января 2023 г.

Принята к публикации: 25 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

высокое давление, среднее давление, ротор, цилиндр, пароперегреватель, выходной коллектор

Аннотация. Действующие руководящие документы рекомендуют оценивать качество проведения пусковых и остановочных режимов, а также режимов работы под нагрузкой по соответствию пусковых параметров графикам-заданиям, типовым инструкциям, режимной карте, критериям надежности и их предельным значениям. Качество ведения эксплуатационных режимов предлагается оценивать по назначенным отклонениям параметров от значений, указанных в типовых инструкциях или графиках-заданиях. Проанализированы предложенный подход и принятые значения допустимых отклонений параметров, по которым производится оценка качества проведения пусковых операций с точки зрения термонапряженного состояния критических элементов тепловой схемы. Анализ выполнен на основе расчетов термонапряженного состояния наиболее нагруженных ротора высокого давления паровой турбины и выходного коллектора пароперегревателя высокого давления котла-утилизатора при отклонениях температуры свежего пара от графика-задания. Предложено оценку качества пусковых режимов проводить на основе расчета циклической прочности «критических» элементов энергоустановки, а не по превышению значений контрольных параметров без учета конкретного времени возникновения этого превышения по отношению к графику-заданию, температурного состояния рассматриваемого элемента, расхода пара и т. д. Все рассмотренные в качестве примера отклонения параметров не оказывают влияния на циклическую прочность рассматриваемого оборудования. Наиболее точно оценить качество проведения режима можно посредством мониторинга режимов работы турбины и котлоагрегата, что позволит контролировать соблюдение критериев надежности, не допуская их превышения.

Для цитирования

Радин Ю.А., Конторович Т.С., Мнацаканян В.У. Влияние отклонений параметров в процессе пуска на термонапряженное состояние оборудования ТЭС // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 135–143. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-135-143>




Influence of parameter deviations during start-up on the power plant equipment thermal stressed state

Yuri A. Radin^{a,b}  , Tatiana S. Kontorovich^a , Victoria U. Mnatsakanyan^c 

^aJoint-Stock Company for Power and Electrification “Mosenergo”, Moscow, Russian Federation

^bRUDN University, Moscow, Russian Federation

^cNational Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russian Federation

 RadinYA@mosenergo.ru

Article history

Received: November 29, 2022

Revised: January 17, 2023

Accepted: February 25, 2023

Keywords:

high pressure, medium pressure, rotor, cylinder, stream overheater, output manifold

Abstract. The current guidelines recommend evaluating the quality of start-up and shut-down modes, as well as operation modes under load, according to the compliance of start-up parameters with start-up assignment schedules, standard instructions, a regime map, reliability criteria and their limit values. The quality of maintaining operating modes is proposed to be assessed by the assigned deviations of parameters from the values specified in standard instructions or start-up schedules. The authors analyze the suggested approach and the accepted values of the parameter permissible deviations, according to which the start-up operations quality is assessed in terms of the thermal stressed state of the thermal scheme critical elements. The analysis was performed on the basis of the thermal stressed state calculations of the most loaded steam turbine high-pressure rotor and the high-pressure heat recovery steam generator superheater outlet header with deviations of the live steam temperature from the start-up schedule. It is proposed to evaluate the quality of start-up modes based on the calculation of the cyclic strength the power plant “critical” elements, and not by exceeding the control parameters values without taking into account the specific time of this excess occurrence in relation to the schedule, the temperature state of the element under consideration, steam flow, etc. All parameters deviations considered as an example do not affect the cyclic strength of the equipment in question. The most accurate assessment of the regime quality can be carried out as a result of monitoring the turbine and the boiler unit operation modes, which will make it possible to control compliance with the reliability criteria, preventing them from being exceeded.

For citation

Radin YuA, Kontorovich TS, Mnatsakanyan VU. Influence of parameter deviations during start-up on the power plant equipment thermal stressed state. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):135–143. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-135-143>

Введение

Действующий в настоящее время руководящий документ¹ определяет порядок организации работ по анализу качества пусков (остановов) основного энергетического оборудования с барабанными и прямоточными котлами, конденсационными и теплофикационными турбинами, установленными на ТЭС в России.

Оценка качества проведения пусковых режимов теплоэнергетического оборудования производится на основании соответствия пусковых параметров графикам-заданиям, типовым инструкциям, режимной карте, критериям надежности и их предельным значениям.

При точном следовании этим документам нестационарные температурные напряжения не превышают предельно допустимых значений. Однако при различного рода отклонениях, неизбежных на практике, эти напряжения могут изменяться, даже превышая в отдельных случаях допустимые значения [1–3].

При этом критерии разделяются на основные и дополнительные. К основным критериям относятся

¹ РД 153-34.0-20.585-00. Руководящие указания по анализу качества пуска (останова) основного теплоэнергетического оборудования ТЭС. Утв. Российским акционерным обществом энергетики и электрификации «ЕЭС России» 28.12.1999 г. М.: СПО ОРГРЭС, 2000. 49 с.

те, при превышении которых не предусматривается действие технологических защит, но при их несоблюдении запрещается выполнять пуск оборудования либо требуется разгрузка работающего оборудования вплоть до его останова, а также критерии, несоблюдение которых свидетельствует о нарушениях правил проведения пусковых операций, регламентированных инструкциями по эксплуатации.

К дополнительным критериям отнесены такие, влияние которых на надежность оборудования определяется временем и величиной нарушений этих критериев, то есть носит скорее накопительный характер.

Современный эксплуатационный оперативный контроль параметров, позволяющий избежать превышения допустимых значений критериев надежности, может быть осуществлен с применением информационно-вычислительного комплекса АСУ ТП, локальной подсистемы диагностического контроля оборудования, например с использованием электрической части системы регулирования (ЭЧСР) турбины и т. п.

Для энергоблоков, где отсутствует такой контроль, документ предлагает ряд предельно допустимых отклонений параметров от значений, предлагаемых графиками-заданиями и типовыми инструкциями.

Справедливость предложенного подхода и приведенных значений допустимых отклонений параметров, по которым производится оценка качества проведения пусковых операций, проверена на примере положений, изложенных в РД 153-34.0-20.585-00.

Для современных блочных паровых турбин с двухстенной конструкцией корпусов и эффективной системой обогрева фланцев высокотемпературных цилиндров высокого и среднего давления (ЦВД и ЦСД соответственно) наиболее нагруженными элементами являются роторы высокого и среднего давления (РВД и РСД), нестационарные температурные напряжения в которых ограничивают скорость переходных режимов. Нестационарные температурные напряжения в корпусных деталях (блоках клапанов, внутреннем и наружных корпусах ЦВД и ЦСД) ниже, чем в роторах; к тому же они более инерционны к изменениям режима работы турбин.

Одним из основных критериев обеспечения надежности роторов является резкий прогрев или захлаживание (за время менее 10 минут) металла паровпуска ЦВД, которые определяются по пока-

заниям температуры пара в камере регулирующей ступени (для турбин с сопловым парораспределением). Допустимые отклонения температуры пара в камере регулирующей ступени на начальных этапах пуска ограничиваются значением, меньшим 70 °С. Предполагается, что только при таких отклонениях температуры обеспечивается допустимый уровень температурных напряжений. При значениях, больших или равных заданной, ставится оценка «неудовлетворительно» за проведение пуска.

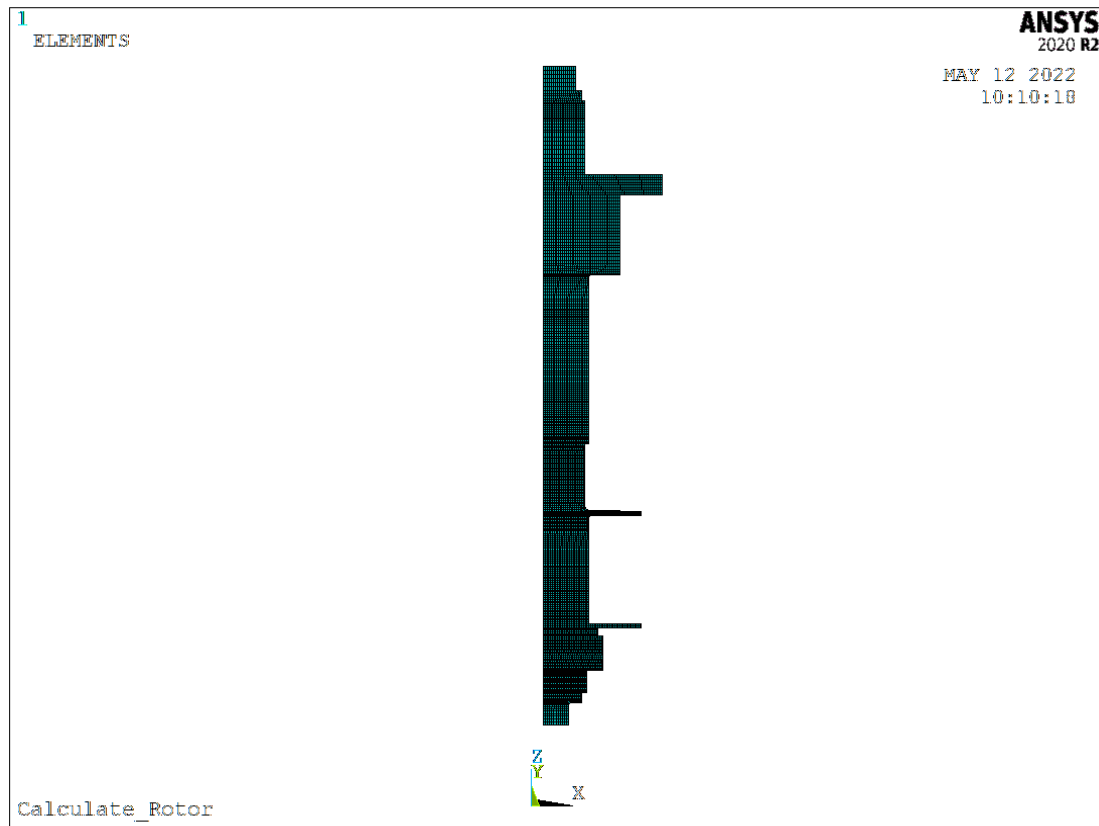
1. Моделирование термонапряженного состояния ротора при отклонении температуры пара

Для проверки данного положения проведены расчеты термонапряженного состояния ротора высокого давления турбины Т-125/150-7,7 при увеличенной на 100 °С по отношению к графику-заданию температуре пара перед первой ступенью на начальном этапе пуска из холодного состояния на протяжении более 60 минут и на этапе нагружения турбины в течение 10 минут. Расчет проводился при помощи программного комплекса ANSYS, позволяющего совместно решать краевые задачи теплопроводности и механики сплошной среды.

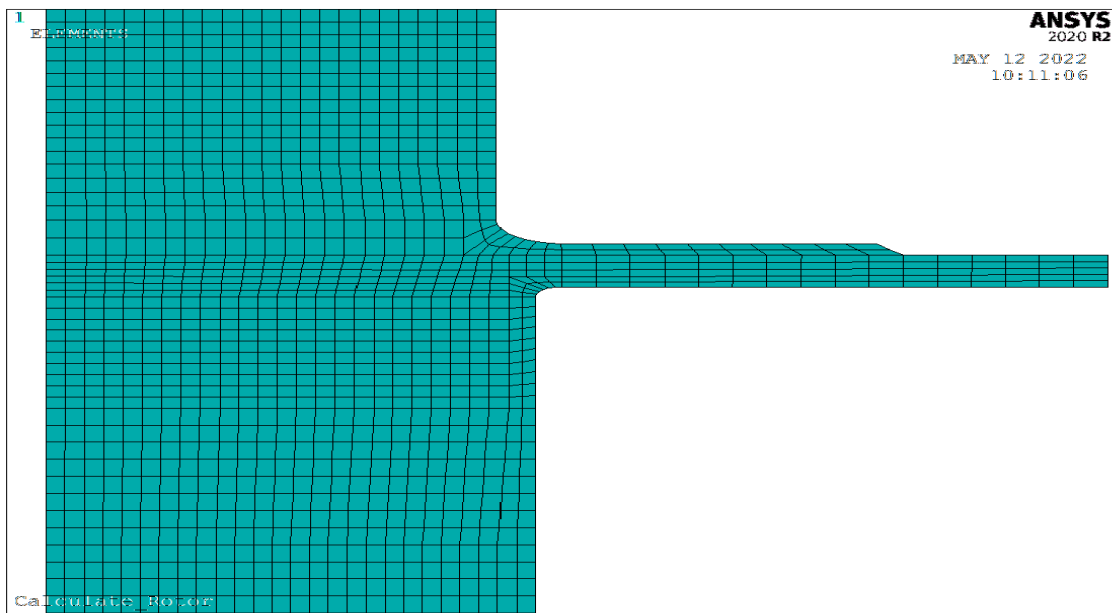
Расчетная объемная осесимметричная конечноеlementная модель ротора высокого давления, учитывающая его конструктивные особенности и схему движения пара, представлена на рис. 1.

Пар в ЦВД движется сначала в сторону переднего подшипника (левый поток), затем совершает поворот на 180° и направляется между корпусами в ступени правого потока. Поэтому в модели оставлены первая и последняя (восьмая) ступени перед поворотом потока и последняя ступень после поворота потока. Эти ступени определяют характер термонапряженного состояния ротора высокого давления. Первая, регулирующая, ступень при переменных режимах эксплуатации испытывает наибольшие напряжения в галтелях, как со стороны промежуточного уплотнения, так и со стороны проточной части. Турбина снабжена паровыми концевыми и промежуточными уплотнениями. Коэффициент концентрации тепловых канавок в уплотнениях рассчитывался в соответствии с РТМ 108.021.1093-85².

² РТМ 108.021.1093-85. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. Утв. 13.09.1985 г. Введ. 01.07.1986 г. Л.: НПО ЦКТИ, 1985. 49 с.



a



б

Рис. 1. Конечноеэлементная модель ротора высокого давления турбины Т-150-7,4:
а – общий вид модели; б – модель ротора в зоне регулирующей ступени
Figure 1. Finite element model of the T-150-7.7 turbine high-pressure rotor:
а – model view illustration; б – rotor model in the control stage zone

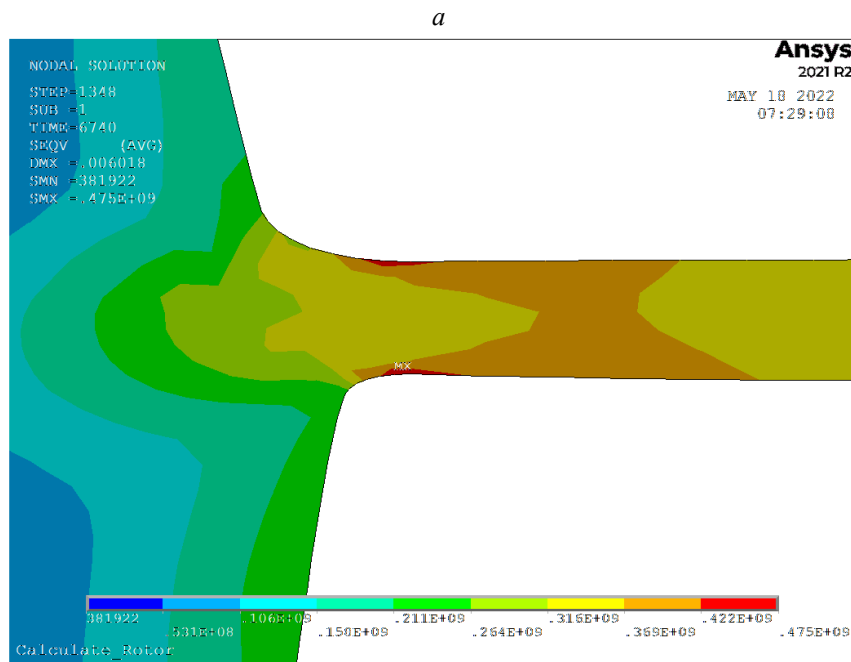
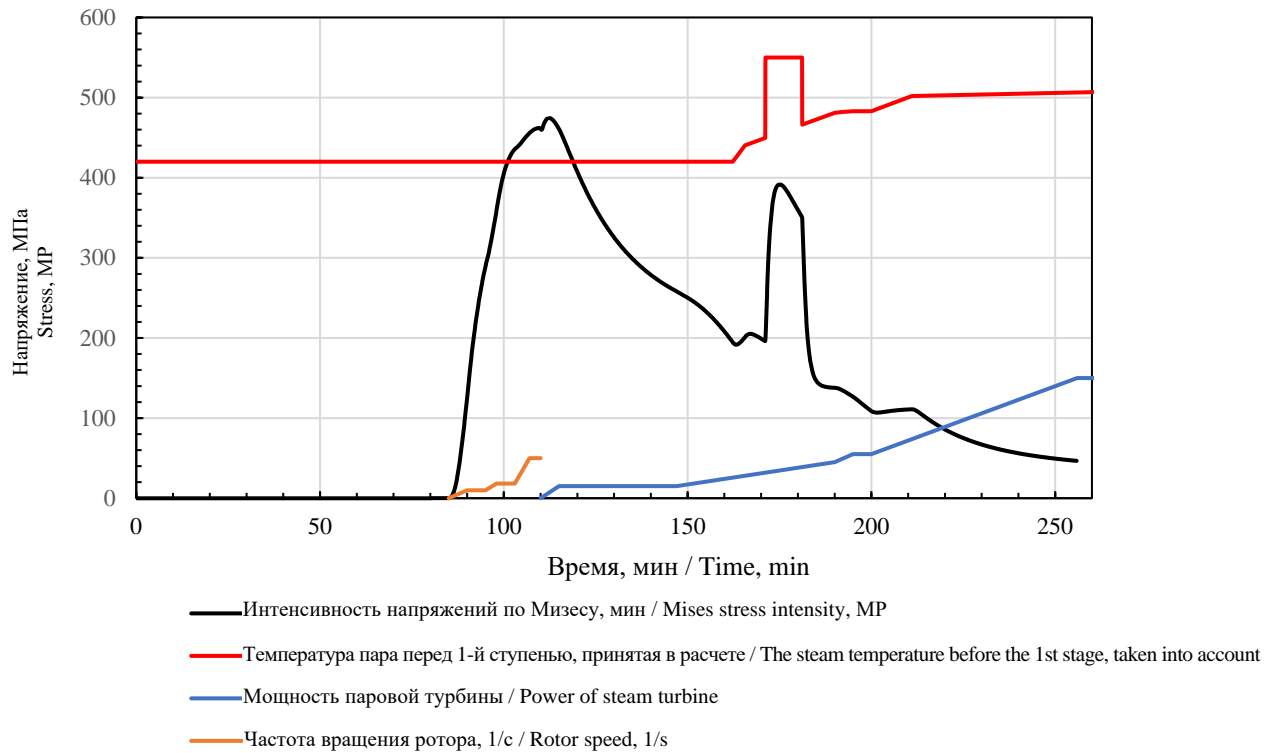


Рис. 2. Результаты расчета термических напряжений в роторе высокого давления турбины Т-125/150-7,7 при пуске из холодного состояния с превышением температуры пара перед первой ступенью на 100 °С:
 а – изменение значений интенсивности напряжений в галтели первой ступени со стороны промежуточного уплотнения;
 б – поле напряжений в галтелях первой ступени турбины Т-125/150-7,7 при пуске из холодного состояния

Figure 2. The results of the thermal stress calculation in the turbine T-125/150-7,7 high-pressure rotor during cold start-up with an excess of steam temperature before the first stage by 100 °С:
 а – change in the stress intensity values in the first stage fillet on the side of intermediate seal;
 б – the stress field in the turbine T-125/150-7,7 first stage during cold start-up

Зонами максимальных напряжений при нагружении и разгрузке являются галтели первой ступени и первый отсек промежуточного уплотнения. В расчетах учитывалось изменение температуры пара, протекающего через лабиринты уплотнений, за счет дросселирования и теплообмена с ротором при переменных режимах. Учет этого явления проводился по хорошо апробированной методике из [4]. Границы элементов выбраны таким образом, чтобы они совпадали с сечениями подвода или отвода пара, что позволяет учесть изменение температуры греющего пара (или воздуха).

Задача механики решалась в условиях закрепления в осевом направлении левого торца ротора турбины, правый торец был свободен.

Вал ротора высокого давления турбины, цельнокованный, изготовлен из стали 25X1M1ФА (P2MA). Теплофизические и механические свойства этой стали, принятые при расчете напряжений, заданы в соответствии с [5–7] линейно зависящими от температуры.

К числу критических с точки зрения малоциклового усталостной прочности элементов относится также поверхность центрального осевого канала, где велико влияние ползучести на номинальном режиме эксплуатации.

Как показали проведенные расчеты, при повышении температуры пара перед первой ступенью во время пуска из холодного состояния максимальные по абсолютной величине значения интенсивности напряжений возникают в галтели регулирующей ступени со стороны промежуточного уплотнения. Их величина составляет $\sigma_i = 475$ МПа. Результаты расчета представлены на рис. 2.

2. Расчет циклической прочности ротора

Расчет циклической прочности показал, что этим напряжениям соответствует 21 300 допускаемых циклов по теоретической кривой малоциклового усталости. Согласно СТО 70238424.27.100.016-2009³, оборудование парогазовых установок (ПГУ) (кроме газотурбинных установок, ГТУ) должно быть рассчитано на не менее чем 10 000 пусков-прерываний за весь срок службы. При этом ко-

личество пусков из холодного состояния должно составлять не менее 20 % от общего количества пусков. Полученное значение допускаемого числа пусков из холодного состояния с превышением на 100 °С температуры перед первой ступенью отвечает этим требованиям, и такое превышение параметров относительно графика-задания не подлежит оценке.

Отклонение температуры пара в 100 °С в течение 10 минут перед первой ступенью на этапе нагружения турбины, когда ротор уже достаточно прогрет привело к возникновению в галтели первой ступени напряжений, интенсивность которых равна 391,5 МПа. Допускаемое число таких режимов, как показали расчеты циклической прочности, составляет 22 200. Как и в предыдущем случае, такое превышение параметров по отношению к графику-заданию не подлежит оценке.

Что касается котлоагрегата, то был рассмотрен резкий прогрев или захлаживание на 100 °С и более температуры металла выходных коллекторов ВД. Число таких нарушений критерия пуска более 15 раз оценивается как неудовлетворительное.

Рассматривался выходной коллектор пароперегревателя высокого давления типоразмером 426×34 мм, широко применяемый в ПГУ-450, работающий при начальной температуре металла 50 °С, температуре пара 400 °С, которая поддерживается неизменной на протяжении двух минут, затем скачком температура пара повышается до 500 °С и поддерживается неизменной в течение 10 минут. Далее скачком температура пара понижается до исходного значения 400 °С.

В первом варианте расчета при начальном расходе пара 20 кг/с и давлении 3,5 МПа коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по формуле теплоотдачи при турбулентном течении пара [8]

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}, \quad (1)$$

где Nu – критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda},$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); l – характерный размер, в данном случае внутренний диаметр, м; λ – коэффициент теплопроводности Вт/(м·К); Re – критерий Рейнольдса;

³ СТО 70238424.27.100.016-2009. Парогазовые установки. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. Утв. и введ. в действие приказом НП «ИНВЭЛ» от 21.12.2009 г. № 94/3. Введ. 29.01.2010 г. М.: НП «ИНВЭЛ», 2009. 41 с.

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

где w – характерная скорость, м/с; ν – кинематическая вязкость среды, м²/с; d – гидравлический диаметр, м; Pr – критерий Прандтля, составивший $\alpha = 500\text{--}506$ Вт/(м²·К).

Максимальное значение амплитуды интенсивности напряжений при этом равно 167 МПа. Допустимое число таких режимов составляет 10 960, и данный режим не должен подлежать оценке.

Результаты расчета представлены на рис. 3 в виде зависимости от времени амплитуды интенсивности напряжений на внутренней поверхности коллектора, температур пара и металла.

Даже если принять значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = 1000$ Вт/(м²·К), то расчет циклической прочности показал, что допустимое количество таких скачкообразных изменений температуры пара на начальных этапах пуска

составляет 3354, что отвечает требованиям к маневренности парогазовых установок и не должно подлежать оценке.

Если рассмотреть график-задание пуска ПГУ-450 из холодного состояния (рис. 4) и принять, что скачкообразный подъем температуры происходит в процессе пуска в интервале от 450 до 490 °С с последующей выдержкой при этой температуре в течение 10 минут и скачкообразным снижением температуры до исходного значения 450 °С, а также что начальная температура металла составила 440 °С, рассчитанный коэффициент теплоотдачи равен $\alpha = 1010$ Вт/(м²·К), что соответствует расходу пара, равному 0,7 от номинального значения $G = 65$ кг/с, давлению $p = 5,39$ МПа, то максимальное значение амплитуды интенсивности напряжений – 35,7 МПа. Число таких режимов не ограничено и оценке подлежать не должно.

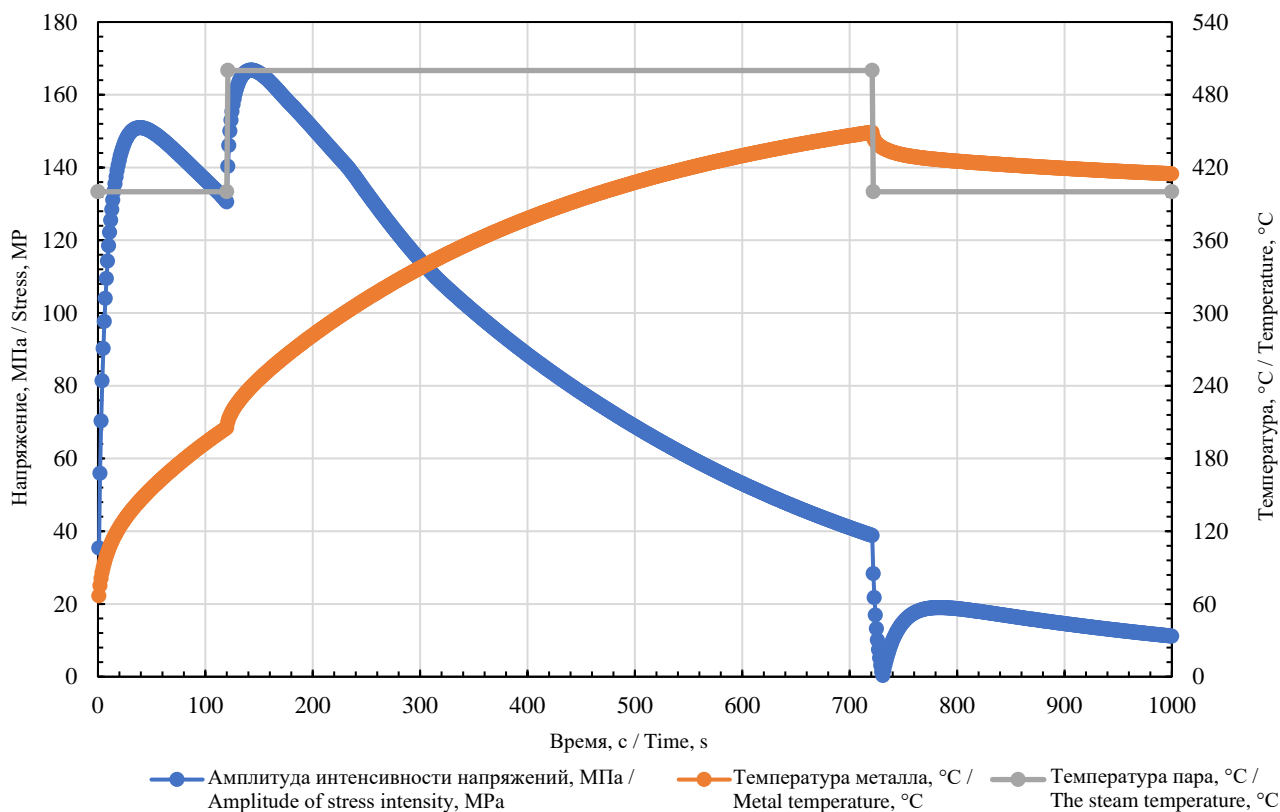


Рис. 3. Результаты расчета термонапряженного состояния выходного коллектора пароперегревателя ВД типоразмера 426×34 со скачкообразным повышением температуры

Figure 3. The results of the HP superheater output header of size 426×34 thermal stressed state calculation with a temperature spike

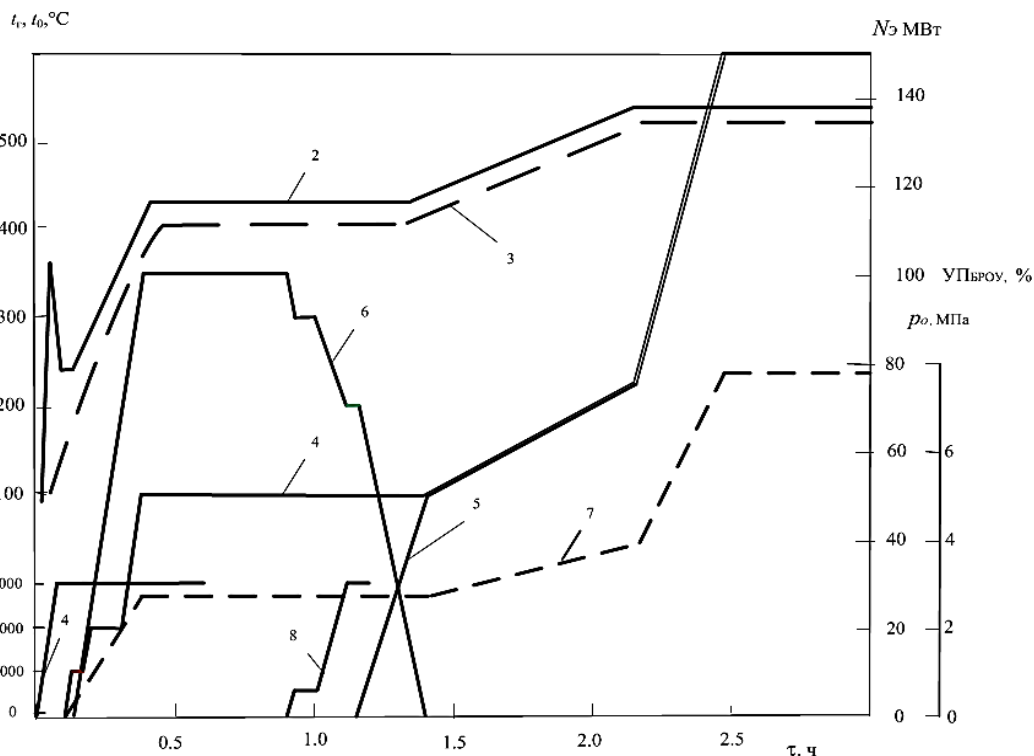


Рис. 4. График-задание пуска ПГУ-450 из холодного состояния:

1 – частота вращения ротора ГТ, 1/мин; 2 – температура газов за ГТУ, °С; 3 – температура свежего пара, °С; 4 – мощность ГТУ, МВт; 5 – мощность ПТ, МВт; 6 – индикатор положения БРОУ; 7 – давление свежего пара, кг/см²; 8 – частота вращения ротора ПТ, 1/мин

Figure 4. CCGP-450 cold start-up schedule:

1 – GT rotor speed, 1/min; 2 – gas temperature of gas turbine downstream, °C; 3 – live steam temperature, °C; 4 – gas turbine power, MW; 5 – steam turbine power, MW; 6 – bypass station position indicator; 7 – live steam pressure, kg/cm²; 8 – steam turbine rotor speed, 1/min

Заклучение

Подводя итог всему, можно сделать следующие выводы:

1. Оценка качества проведения пусковых режимов должна проводиться на основе расчета циклической прочности критических элементов энергоустановки. Выставление оценок по превышению значений контрольных параметров без учета конкретного времени возникновения этого превышения по отношению к графику-заданию, температурного состояния рассматриваемого элемента, расхода пара и т. д. не позволяет судить о выполнении критериев надежности.

2. Наиболее точная оценка качества проведения режима может быть получена посредством мониторинга работы турбины и котлоагрегата и автоматического управления работой энергоустановки по термонапряженному состоянию ее критических элементов. Это позволит не только контролировать соблюдение критериев надежности, но и не допустить их превышения.

Список литературы

1. Jackson P.S., Moelling D.S., Anderson F.C., Mailoy J.W. Operating experience of large reheat HRSG's in merchant service // Proceedings of POWER-GEN International. Orlando: POWER-GEN International, 2004. 32 p. URL: https://tetra-eng.com/PDF/Papers/paper_OPERATINGEXPERIENC E.pdf (дата обращения: 22.05.2022)
2. Богачев А.Ф., Радин Ю.А., Герасименко О.Б. Особенности эксплуатации и повреждаемость котлоутилизаторов бинарных парогазовых установок. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.
3. Boiler codes require updating to address failure mechanisms exacerbated by cycling // Combined Cycle Journal. 2006, First Quarter.
4. Плоткин Е.Р., Лейзерович А.Ш. Пусковые режимы паровых турбин энергоблоков. М.: Энергия, 1980. 192 с.
5. Либерман Л.Я., Пейсихис М.Н. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении: в 3 т. Л.: ЦКТИ, 1966–1967.
6. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширских Ю.В., Астахов Ю.И., Голеньшина Л.Г., Григорьева Н.Н., Гудков В.Н., Десярев А.Ф., Долбенко Е.Т., Жаров В.В.,

Кириллова О.М., Клауч Д.Н., Кузнецов Е.В., Меньшова Н.Ф., Митина Е.Н., Петропавловская З.Н., Русинова И.Н., Рязанова Е.Д., Скоробогатых В.Н., Томина С.П., Тыкочинская Т.В., Шиrolapова Т.Б. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

7. Неймарк Б.Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник. М. – Л.: Энергия, 1967. 240 с.

8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 343 с.

References

1. Jackson PS, Moelling DS, Anderson FC, Mailoy JW. Operating experience of large reheat HRSG's in merchant service. *Proceedings of POWER-GEN International*. Orlando: POWER-GEN International; 2004. Available from: https://tetra-eng.com/PDF/Papers/paper_OPERATINGEXPERIENC E.pdf (accessed: 05/22/2022)

2. Bogachev AF, Radin YuA, Gerasimenko OB. *Features of operation and damage of heat recovery boilers*

of binary combined-cycle gas installations. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 2008. (In Russ.)

3. Boiler codes require updating to address failure mechanisms exacerbated by cycling. *Combined Cycle Journal*. 2006, First Quarter.

4. Plotkin ER, Lazerovich AS. *Starting modes of steam turbines of power units*. Moscow: Energiya Publ.; 1980. (In Russ.)

5. Lieberman LYa, Peisikhis MN. *Properties of steels and alloys used in boiler-turbine construction*. Leningrad: CKTI Publ.; 1966–1967. (In Russ.)

6. Zubchenko AS, Koloskov MM, Kashirskikh YuV, Astakhov YuI, Golenypina LG, Grigorieva NN, Gudkov VN, Degtyarev AF, Dolbenko ET, Zharov VV, Kirillova OM, Klauch DN, Kuznetsov EV, Menshova NF, Mitina EN, Petropavlovsk ZN, Rusinova IN, Ryzanova ED, Skorobogatykh VN, Tomina SP, Tykochinskaya TV, Shirolapova TB. *Steel and alloy grader* (A.S. Zubchenko, Ed.). Moscow: Mashinostroeniye Publ.; 2003. (In Russ.)

7. Neymark BE. *Physical properties of steels and alloys used in power engineering: handbook*. Moscow, Leningrad: Energiya Publ.; 1967. (In Russ.)

8. Mikheev MA, Mikheeva IM. *Fundamentals of heat transfer*. Moscow: Energiya Publ.; 1977. (In Russ.)

Сведения об авторах

Радин Юрий Анатольевич, доктор технических наук, главный специалист службы вибродиагностики и наладки, Инженерное управление, ПАО «Мосэнерго», Российская Федерация, 119526, Москва, пр-кт Вернадского, д. 101, корп. 3; заведующий кафедрой энергетического машиностроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0008-5895-5578, Scopus Author ID: 6602835955, eLIBRARY SPIN-код: 7058-4682; RadinYA@mosenergo.ru

Конторович Татьяна Савельевна, кандидат технических наук, ведущий специалист, Инженерное управление, ПАО «Мосэнерго», Российская Федерация, 119526, Москва, пр-кт Вернадского, д. 101, корп. 3; ORCID: 0009-0009-0084-2674, Scopus Author ID: 6505938504, eLIBRARY SPIN-код: 4894-0720; kontorovich_ts@mail.ru

Мнацаканян Виктория Умедовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-код: 8693-8313; artvik@bk.ru

About the authors

Yuri A. Radin, Doctor of Sciences (Techn.), chief specialist of the vibration diagnostics and adjustment service, Engineering Department, Joint-Stock Company for Power and Electrification “Mosenergo”, 101 Prospekt Vernadskogo, bldg 3, Moscow, 119526, Russian Federation; Head of the Department of Power Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-5895-5578, Scopus Author ID: 6602835955, eLIBRARY SPIN-code: 7058-4682; RadinYA@mosenergo.ru

Tatiana S. Kontorovich, PhD, chief specialist, Engineering Department, Joint-Stock Company for Power and Electrification “Mosenergo”, 101 Prospekt Vernadskogo, bldg 3, Moscow, 119526, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-0084-2674, Scopus Author ID: 6505938504, eLIBRARY SPIN-code: 4894-0720; kontorovich_ts@mail.ru





Victoria U. Mnatsakanyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mining Equipment, Transport and Mechanical Engineering, National Research Technological University “MISIS”; 4 Leninskii Prospekt, bldg 1, Moscow, 119049, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-code: 8693-8313; artvik@bk.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-144-156
EDN: BJNKQE
UDC 620.9

Research article / Научная статья

Technical and economic aspects of the development of green energy in the Middle East region

Dmitry N. Ermakov^a , Sergei A. Kupreev^a ✉, Oleg E. Samusenko^a ,
Evgeny V. Kuznetsov^{a,b} , Oleg Yu. Kazenkov^{a,b} , Irina V. Burkova^c 

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bPolyus Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow, Russian Federation

^cInstitute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ kupreev-sa@rudn.ru

Article history

Received: October 12, 2022

Revised: November 28, 2022

Accepted: November 30, 2022

Keywords:

wind power, nuclear energy, alternative energy sources, renewable energy sources, environmental policy, solar energy, energy market

Abstract. The effectiveness of solar and wind power plants has been analyzed, as well as the prospects for the development of green energy in the countries of the Middle East region. The development of green energy contributes, on the one hand, to saving fossil fuels extracted from the earth there-by extending their use, and on the other hand, the alternative high-tech complexes working on solar and wind energy could also be widely applied. Comparative characteristics of solar and wind energy are given, as well as an assessment of the effectiveness of its use in the states of Middle East is carried out. It was concluded that it is necessary to develop and create energy-technological complexes based on the synthesis of solar panels and wind generators, and electric energy storage systems. Project proposals for the energy-technological complex of the countries of Middle East based on solar and wind installations are posed.

Acknowledgements

This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

For citation

Ermakov DN, Kupreev SA, Samusenko OE, Kuznetsov EV, Kazenkov OYu, Burkova IV. Technical and economic aspects of the development of green energy in the Middle East region. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2): 144–156. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-144-156>

Технико-экономические аспекты развития зеленой энергетики в государствах Арабского Востока

Д.Н. Ермаков^a , С.А. Купреев^a ✉, О.Е. Самусенко^a , Е.В. Кузнецов^{a,b} , О.Ю. Казенков^{a,b} , И.В. Буркова^c 

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bНИИ «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха, Москва, Российская Федерация

^cИнститут проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

✉ kupreev-sa@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 октября 2022 г.

Доработана: 28 ноября 2022 г.

Принята к публикации: 30 ноября 2022 г.

Аннотация. Проанализированы эффективность применения солнечных и ветряных энергоустановок и перспективы зеленой энергетики в странах Арабского Востока. Развитие зеленой энергетики способствует, с одной стороны, экономии добываемых в земле углеводородных топлив и тем



Ключевые слова:

сила ветра, атомная энергия, альтернативные источники энергии, возобновляемые источники энергии, экологическая политика, солнечная энергетика, энергетический рынок

самым продлению сроков их использования, а с другой – применению альтернативных высокотехнологичных комплексов с использованием энергии Солнца и ветра. Приведены сравнительные характеристики применения солнечной и ветряной энергетики, проведена оценка эффективности ее применения в государствах Арабского Востока. Сделан вывод о необходимости разработки и создания энерготехнологических комплексов на базе синтеза солнечных батарей и ветряных генераторов, систем аккумулирования электрической энергии. Представлены проектные предложения по энерготехнологическому комплексу стран Арабского Востока на базе солнечных и ветряных установок.

Благодарности

Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

Для цитирования

Ermakov D.N., Kupreev S.A., Samusenko O.E., Kuznetsov E.V., Kazenkov O.Yu., Burkova I.V. Technical and economic aspects of the development of green energy in the Middle East region // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 144–156. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-144-156>

Introduction

Today, the use of renewable energy sources has become one of the main directions for the transition to a sustainable energy system [1]. Interest in the production of electricity from renewable energy sources in the world has increased, as it is one of the elements of the national energy balance in most countries. The Russian leadership is showing attention and interest in the problems of renewable energy. “Of course, we need to deal with alternative types of energy – the sun, and wind, and tidal energy, and hydrogen. Of course, we need to do all this in accordance with the volume of consumption today, with the growth rate of the world economy, with the needs in resources and with the level of technology development. But who does this, looking ahead only for political reasons, especially of an opportunistic political nature?” – noted the President of the Russian Federation Vladimir Putin at the Russian Energy Week forum, held in Moscow on October 12–14, 2022.¹

The 2030 Sustainable Development Plan, adopted by the United Nations in September 2015, provides for the efforts of the entire world community to preserve the environment and reduce harmful emissions. Important for the development of renewable energy is the Paris Agreement on climate

change, concluded on December 12, 2015, which provides for the annual allocation of 100 billion US dollars to developing countries until 2025 to help them reduce harmful emissions.²

In the Russian Federation, renewable energy issues are set out in strategic planning documents, which assume the introduction of 12 GW of generation capacity based on renewable energy sources by 2035.

At a meeting with members of the Government of Russia, President of the Russian Federation Vladimir Putin confirmed the leading position of our country in the field of green energy: “The share of energy from nuclear power plants, hydroelectric power plants, wind and solar power plants exceeds 37 percent.”³ It was also noted that it is necessary to increase the pace of implementation of projects in the nuclear power industry, actively develop small hydroelectric power plants, and use the energy of ebbs and flows. During ten years’ time, from 2010 to 2019, the share of energy derived from renewable sources in the world in total final energy consumption increased by 1.6%. At the same time, over the same period, the total volume of energy con-

² *Measures to combat climate change*. United Nations. (In Russ.) Available from: <https://www.un.org/ru/climatechange/paris-agreement> (accessed: 10.12.2022).

³ Vladimir Putin announced Russia's leadership in green energy. *Lenta.ru*. 2021, October 5. (In Russ.) Available from: <https://lenta.ru/news/2021/10/05/putinzelen/?ysclid=19yo81ivgi719665991> (accessed: 10.10.2022).

¹ V.V. Putin spoke about alternative energy sources. *RIA Novosti*. 2022, October 12. (In Russ.) Available from: <https://ria.ru/20221012/putin-1823366363.html> (accessed: 10.10.2022).

sumption from renewable sources grew much more significantly – by 25%. The most rapid progress is observed in the electricity sector – the share of renewable energy sources in it increased from 19.7% in 2010 to 26.2% in 2019. At the same time, in 2019, this sector accounted for only a fifth of the final energy consumption in the world. Half of global energy consumption comes from thermal generation, but progress in this sector has been modest: in 2019, the share of modern renewable energy was 10.1%, i.e. increased by less than 2% compared to 2010. In 2019, the share of renewable energy sources used in the transport sector reached 3.6%, while in 2010 this figure was 2.6%.

In 2019, traditional uses of biomass, such as burning wood for heating, still generate almost a third of total energy consumption from renewable sources. Effectively addressing climate change will require enhanced policy support across all sectors and effective tools to further mobilize private capital, including for developing countries. Achieving the global energy efficiency target is still possible, but only with significant systematic investment increasing energy efficiency is essential to achieving global climate change goals. To solve the set task by 2030, it is necessary to annually increase energy intensity by 2.6%, which is twice as high as the rates observed from 1990 to 2010 [2].

Global primary energy intensity, calculated as the ratio of total energy use to GDP, decreased from 5.6 MJ/US\$ (2017 purchasing power parity) in 2010 to 4.7 MJ/US\$ in 2019, while the rate of decline averaged 1.9% per year. To meet the Sustainable Development Goals (SDG) target and make up for lost time, the rate of increase in energy intensity by 2030 must average 3.2% per year. This is still possible, but only if there is significant systematic investment in cost-effective energy efficiency technologies. The pace of progress varies from region to region due to differences in economic structure, energy use and electrification levels. The only region that has met the target so far is East and Southeast Asia, where the average annual rate in 2010–2019 was 2.7%, supported by strong economic growth. While the challenge of combating climate change is becoming increasingly urgent, growth in

international public funding for renewable energy had slowed even before the pandemic. International government funding to developing countries to support clean energy development has declined for the second year in a row. In 2019, such financing amounted to \$10.9 billion, which is almost 24% less than a year earlier. In addition, for the first time since 2008, the five-year moving average decreased from \$17.5 billion in 2014–2018 to USD 16.6 billion in 2015–2019. The impact of the COVID-19 pandemic could have caused another downturn in 2020. In 2019, more than 52% of commitments made were for loans. Nearly 17% were grants, indicating an increase in the use of non-indebted aid to developing countries. Another promising way is shares in collective investment such as investment funds, which reached \$191 million in 2019, up 91% from 2018. In 2019, LDCs accounted for 25.2% of pledged aid compared to 21% in 2018, but its volume has decreased from USD 3.0 billion to USD 2.7 billion [3].

The widespread use of renewable energy sources, especially from the Sun (depending on solar photovoltaic technology) and wind, has led to a noticeable decrease in the cost of electricity (an increase in renewable energy production can be seen in Figure 1, where the main share falls on wind and solar energy) [4].

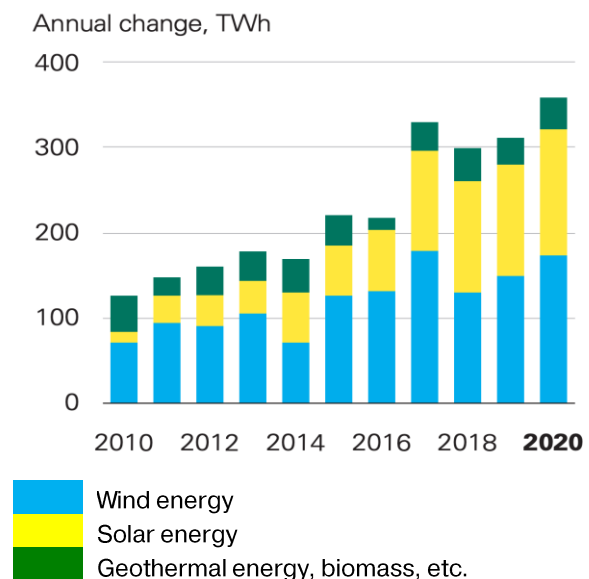


Figure 1. Renewable energy production

By 2025, an increase in the rate of electricity generation from renewable energy sources is predicted by about a third, but with a limited increase in the heating and heat production sector, as well as in transport [5].

According to information provided by ourworldindata.org, about 1/3 of the world's electricity generation capacity in 2021 came from low-carbon sources. For example, the share of electricity from low-carbon sources in Saudi Arabia for 2021 was 0.23%; United Arab Emirates – 11.26%; Qatar – 0.25% (Figure 2). The countries of the Middle East, while continuing to increase the pace of production of low-carbon energy (solar, wind, biomass and waste, geothermal, tidal, etc.), continue to lag behind the world leaders.

Renewable energy sources, which make up about 26–28% on a global scale, are actively developing all over the world. If in some countries of the Middle East there is no nuclear energy (Figure 3), then almost all countries are aimed at the active de-

velopment of renewable energy sources, as evidenced by the strategies adopted at the state level and other planning documents. Thus, Egypt and Morocco, despite the uneven dynamics of the development of this segment, demonstrate fluctuations between 13 and 18%, which is commensurate with the use of renewable energy sources in the USA and Russia [6].

The production of electricity per capita is indicative. Despite ongoing efforts to develop renewable energy sources, a large share of energy production per capita comes from gas, coal and oil, as shown in Figure 4.

The increase in renewable energy capacity in the US, China and India combined will lead to a significant reduction in the cost of energy. Currently, many countries are aimed at signing long-term agreements on the purchase of electricity for the needs of public utilities [7].

Figure 4 shows the expected sectoral development of renewable energy demand from 2015 to 2025.

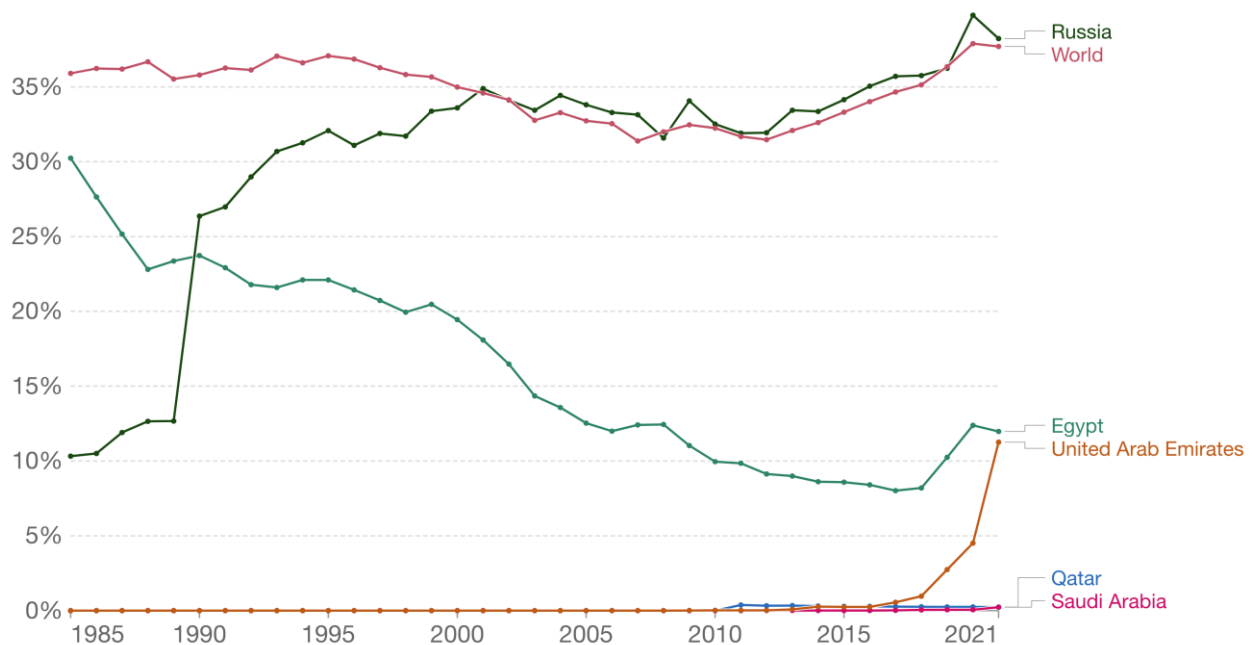
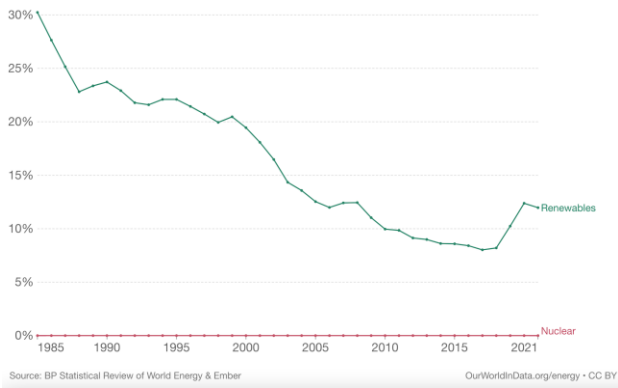
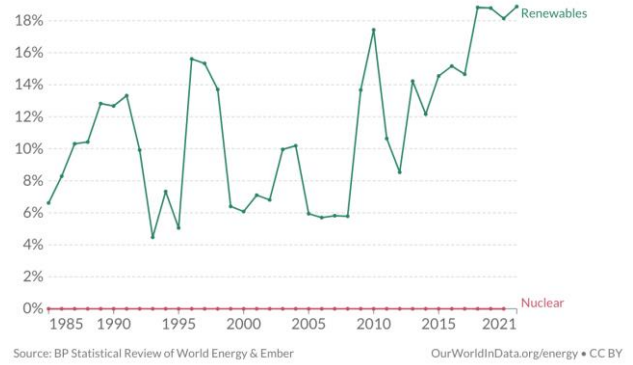


Figure 2. Share of energy from low-carb sources

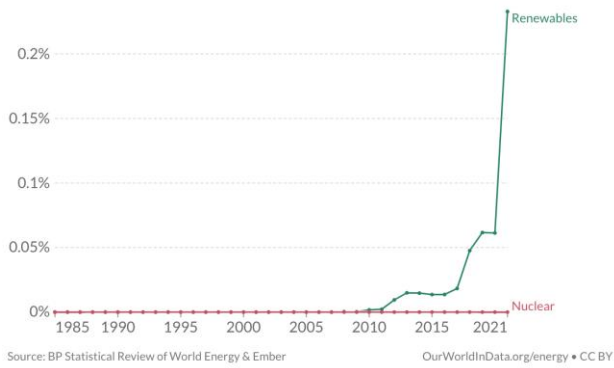
Source: Ritchie H, Roser M. Electricity mix. *Our World in Data*. Available from: <https://ourworldindata.org/electricity-mix> (accessed: 15.11.2022).



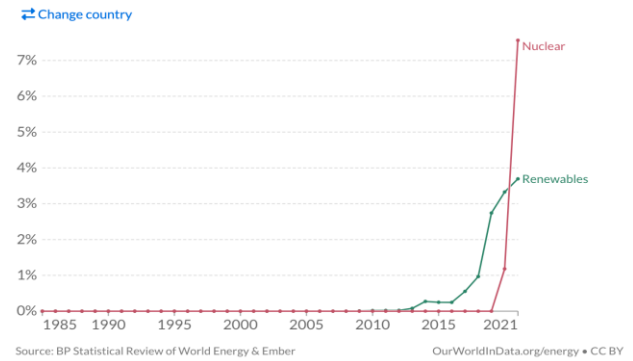
Egypt



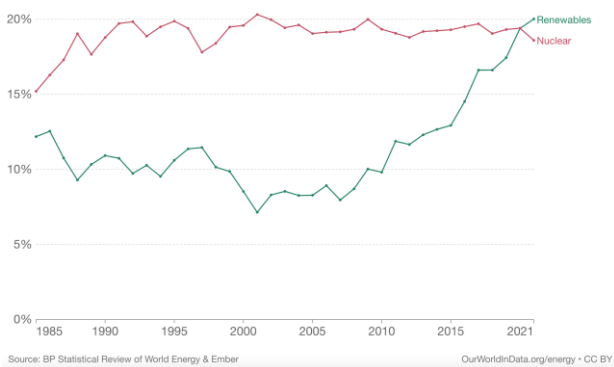
Morocco



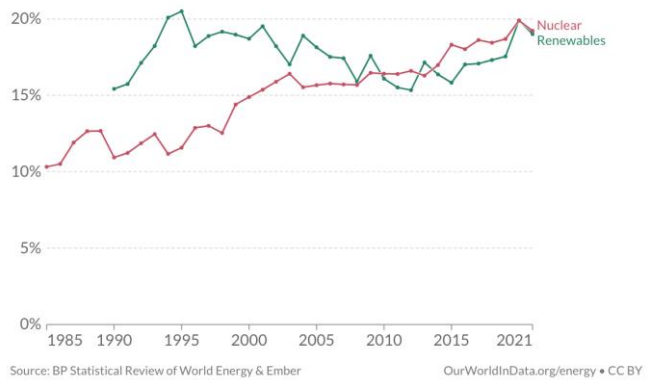
Saudi Arabia



United Arab Emirates



USA



Russia

Figure 3. Share of renewable and nuclear energy

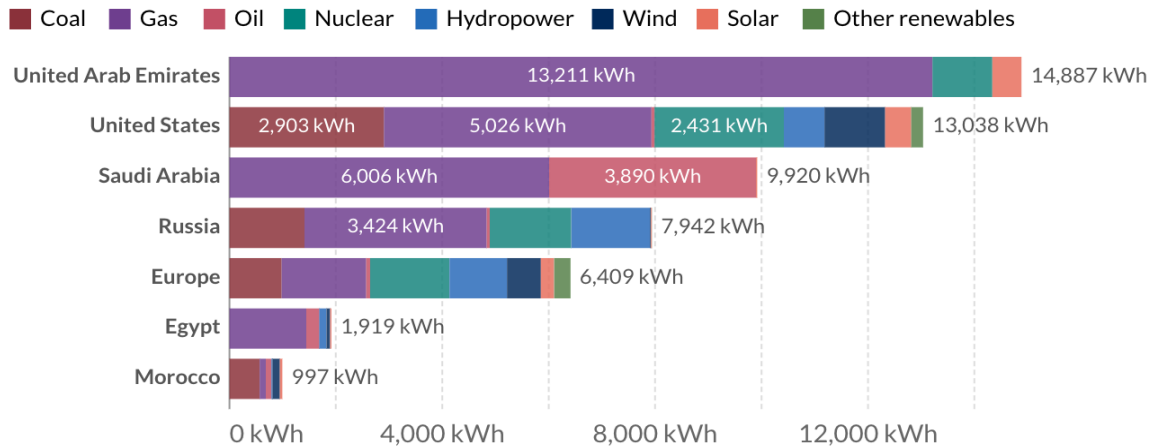


Figure 4. Power generation per capita by source, 2021

Source: Ritchie H, Roser M. Electricity mix. *Our World in Data*. Available from: <https://ourworldindata.org/electricity-mix> (accessed: 15.11.2022).

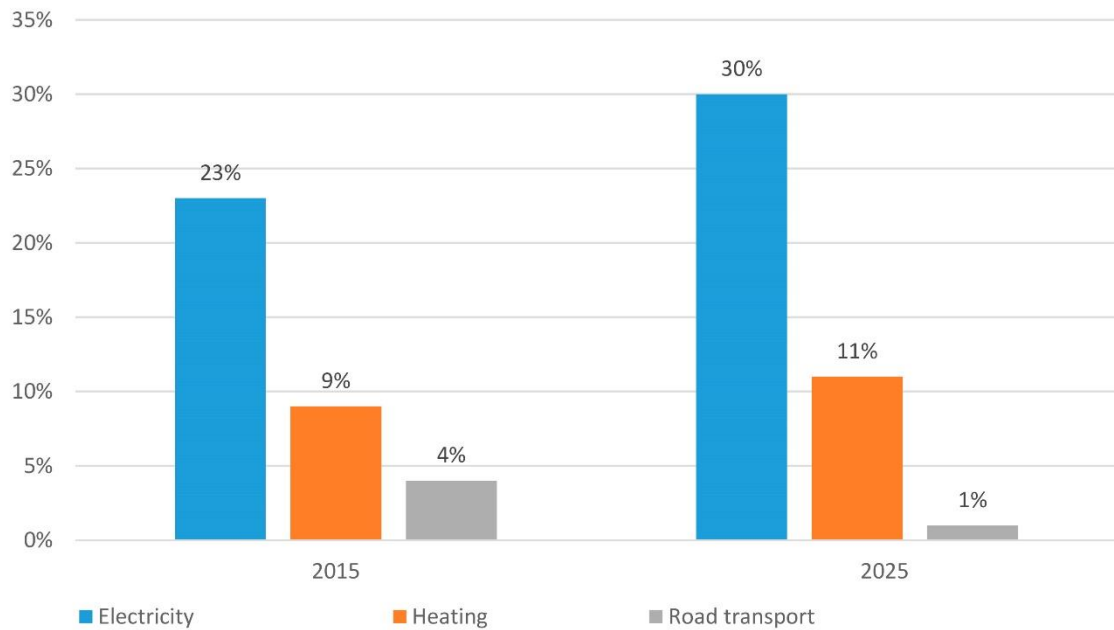


Figure 5. Projected industry development of global renewable energy demand in 2015–2025 [8]

1. Features of the technical and economic development of renewable energy in the countries of Middle East

Renewable energy is still a minor issue in public opinion in the countries of the Middle East region. The reason for this may be due to the dominance of the oil sector (oil and gas) in the local energy market

and the neglect of the importance of this modern industry. Preservation of the environment has become the responsibility of the whole world and therefore has stimulated national environmental protection activities during environmental disasters since the industrial revolution. The energy sector contributes to industrial and economic achievements and is a prerequisite for meeting basic human needs [9].

Renewable energy sources play an important role in achieving sustainable development; although studies on it were started by accident in the 30s of the last century, they still cause discussion and study, especially after the energy crisis of the 1970s, which affected the economic and social life in the world. Industrialized countries have been looking for alternatives to achieve economic independence and security, and countries such as China, Denmark, Iceland and Germany have succeeded in this.

The emergence and export of oil in the Arab region was a decisive historical revolution in overcoming the isolation of the region. Suddenly there was a socio-economic transformation. Within a few decades, something like a value revolution took place, the result of which was a crack in the value system, and many crafts were destroyed in favor of the spread of a new production model, which also brought a consumer culture in need for help [10].

Such components of the natural environment as climate, geographical location and natural resources had a significant impact on social life, since the population density was formed in regions without others, which contributed to the impact on the structure of production and the social organization of these entities, thereby creating cultural diversity and diversity of heritage, some of which were subject to change, while others were reluctant to endure the rigors of the times. It is well known that the society

of the Arab countries of the Persian Gulf as a whole is a tribal society, which, before the discovery of oil, relied on traditional models of production, such as agriculture, herding, pearling and fishing. However, after that it was accompanied by many changes at various levels.

The enormous influence of modern and advanced technologies and facilities has effectively contributed to the growth of modern cities with all their amenities, beauty and speed of expansion. To achieve the seventh United Nations Sustainable Development Goal by providing clean and affordable energy, the Kingdom of Bahrain has worked to capitalize on affordable sustainable renewable energy, and the Electricity and Water Authority has started to promote the use of renewable energy through a project to install solar energy systems in houses, as well as through the implementation of the solar energy plant project with a production capacity of 100 MW.

The Arab countries are approximately 94% dependent on fossil fuels as their main source of electricity generation, with a modest contribution from renewable energy sources (solar and wind). A pleasant exception is the state of Sudan, which receives electricity from the floods of the Nile River in addition to oil.

Figure 5 shows the percentage of the contribution of renewable energy sources to the energy produced in the Middle East region.

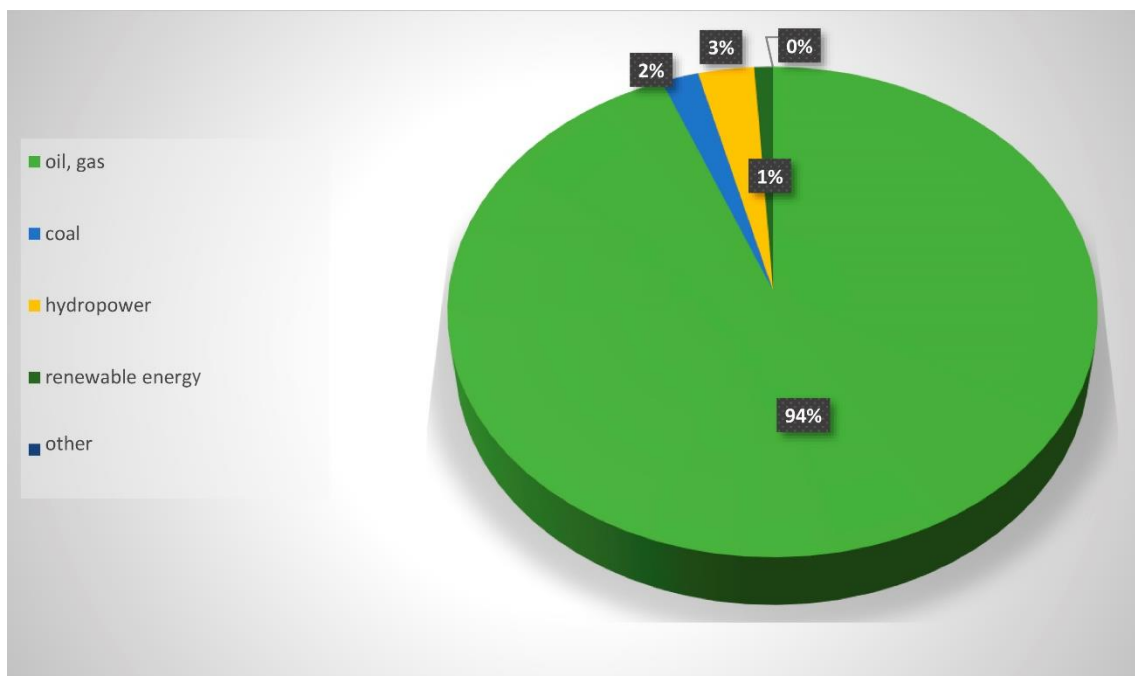


Figure 6. Percentage of renewable energy contribution to energy produced in the Middle East region, 2017–2022 [11]

In the countries of the Middle East region, there is a growing interest in the use of renewable energy sources (especially solar and wind). Electricity producers in the Arab countries that import energy make a significant contribution to the diversification of the national energy mix.

The total capacity of renewable energy sources (without hydropower) in the Arab countries is about 5100 MW, including 1972 MW from solar photovoltaic system, 2559 MW from wind, 325 MW from solar thermal concentrators and 244 MW from bioenergy. At the end of 2017, Morocco, Egypt, Tunisia, and Jordan, due to the lack of traditional energy sources, have made great strides in using wind energy to generate electricity.

At the end of May 2018, Jordan abandoned the construction project with the participation of the state corporation Rosatom of a large-capacity nuclear power plant worth \$10 billion, on the same days Russia and Jordan signed an agreement on the development of a project for the construction of a small-capacity nuclear power unit (about 200 MW) on the Jordanian territory for Russian project.

The request of the Russian side to pay for the construction of the first nuclear power plant in Jordan with loans from commercial banks caused the cancellation of the agreement signed between the commission and the Russian company Rosatom. The Jordanian leadership has demonstrated a general trend characteristic of the states in the Middle East region – a phased transition to the use of solar energy.⁴

The interest in the use of wind energy of the governments of the states in the Middle East region is increasing in the presence of regions characterized by a “wind rose” in terms of frequency and average annual wind speed, which were obtained as a result of scientific research. A significant role is given to the local industry, which produces some components of wind power equipment.

Photovoltaic solar system technology, given its low cost and suitability for rural and remote areas, is attracting the attention of most countries with different economies and natural resources, whether they are energy exporters or importers (e.g. Algeria, Jordan). PV projects for lighting, water pumping and desalination are expected to continue to expand

in most Arab countries. And at present, Morocco is still the first country in the region in the field of concentrated solar thermal power plants.

2. Characteristics of the production of electricity from renewable energy sources in the countries of the Middle East region

Two millennia after the ancient Egyptians abandoned their God of Sun Ra, their descendants are rediscovering the power of the Sun. In the southern desert, half an hour from Aswan, Egypt is putting the finishing touches on Benban, one of the world's largest solar farms. Its 6-meter panels produce 1.5 GW of energy, enough to power more than 1 million homes. “In ten years, we will still need oil for plastics and other petrochemicals, but not for energy,” says Rabeaa Fattal, a Dubai-based investor in Rising Sun, one of Benban's 40 fields. Most of the energy in the modern Middle East and North Africa is built on oil. This region exports more oil than any other region. A quarter of the Middle East's electricity comes from it, compared to three percent from renewable sources. In the long term, the global trend is towards cleaner energy sources. Renewable energy capacity in the Middle East has doubled to 40 GW over the past decade and should double again by 2024.

Last year, the Arab Republic of Egypt made great strides in renewable energy production as renewable energy production reached nearly 24 GWh. At the same time, wind and solar energy provided 41% of the total amount of energy consumed in the country.

The renewable energy sector in Egypt has been able to make significant gains despite the difficult conditions facing renewable energy markets during the coronavirus pandemic, most notably with the commissioning of a 250 MW wind farm located in the Gulf of Suez. The Arab Republic of Egypt has sold almost 2 million carbon certificates and has made impressive progress in the implementation of a solar photovoltaic power plant near the city of Zaafarany [12].

Egypt is developing projects in the field of solar and wind energy with a total capacity of approximately 3,570 MW. The private sector and foreign investors have purchased about 3,500 MW of these power generation facilities for about \$3.5 billion.

Xlinks has announced the implementation in Morocco, in the area of Guelmim Oued Noun, the largest project to create on an area of 1500 square kilometers of a wind and solar energy facility with a capacity of 10.5 GW. To export the generated energy, 3,800 km of high-voltage DC offshore cables will

⁴ Jordan spoke about the reasons for the cancellation of the agreement with Rosatom on nuclear power plants. *RIA Novosti*. 2018, June 11. Available from: <https://ria.ru/20180611/1522520409.html> (accessed: 15.11.2022).

be laid and a huge battery storage facility with a capacity of 5 GW/20 GW per hour will be built.

A total of 111 clean energy projects are in operation and development in Morocco, while the share of renewable energy in the electricity generated in the country is currently about 37–38%. In 2030, the share of renewable energy sources in the Kingdom of Morocco should exceed 50%.

Electric power generated through the use of renewable energy sources, according to the Ministry of Energy of Morocco, in 2021 amounted to 3.95 thousand MW: 1.43 thousand MW due to wind energy (13.4% of the total electricity capacity), 0.75 thousand MW from solar energy (7.03% of total electricity capacity) and 1.77 thousand MW from hydroelectric power (16.57% of total electricity capacity).

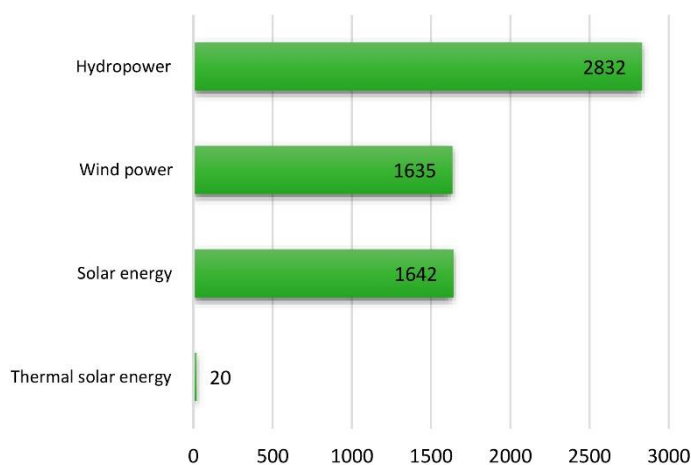


Figure 7. Annual report of the renewable energy authority of the Arab Republic of Egypt

Investments in renewable energy projects in Morocco amounted to USD 5.8 billion. The goal of implementing large-scale projects is to generate up to 52% of energy from renewable sources and create up to 400 thousand jobs in 20 years.⁵

According to official government sources and other publicly available information, in 2020–2021, in response to the COVID 19 pandemic, Saudi Arabia allocated \$6.50 billion to support various forms of energy through new or changed policies. These government monetary commitments include: \$5.59 billion for unconditional use of fossil fuels under 5 strategies (3 quantitative and 2 non-quantitative).⁶ \$906.67 million were allocated for unconditional clean energy under 3 strategies (1 quantitative and 2 non-quantitative). 5.59 billion US dollars were allocated for oil and gas production [13].

⁵ Tuma YM. Arab countries eye energy diversification, including renewables. *Mexico Business News*. 2022, June 7. Available from: https://mexicobusiness-news.translate.google.com/trade-and-investment/news/arab-countries-eye-energy-diversification-including-renewables?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc (accessed: 15.11.2022).

⁶ Saudi Arabia. *Energy Policy Tracker*. Available from: <https://www.energypolicytracker.org/country/saudi-arabia/> (accessed: 15.11.2022).

The significant amount of public funds allocated to support the Saudi economy and people through monetary and fiscal policy in response to the crisis could also benefit various elements of the energy sector. However, these values are not available from official legislation and statements and are therefore not included in the database. Meanwhile, in addition to monetary and fiscal measures, the database lists other policies and regulations that can also provide benefits to producers and consumers of various types of energy. These public monetary obligations are in addition to many other public policies that were in place to support various forms of energy prior to the COVID19 pandemic [9].

3. Prospects for the development of renewable energy in the countries of the Middle East region

At the third session in Riyadh, the Arab Development Summit adopted the Arab Strategy for the Development of the Use of Renewable Energy Sources for 2010–2030.⁷ The strategy provides a scientific and

⁷ *Pan-Arab Renewable Energy Strategy 2030*. International Renewable Energy Agency. Available from: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_PanArab_Strategy_June%202014.pdf (accessed: 15.11.2022).

theoretical basis for the joint actions of the Arab states in the field of renewable energy sources. Thanks to the implementation of this strategy, the share of renewable energy sources in electricity generation in the Arab region in 2020 reached 5.1%.

The Executive Office of the Arab Council of Ministers of Electricity of the League of Arab States adopted the Guidelines for Arab Countries on Renewable Energy and its Annex – Model of National Renewable Energy Plans, and encouraged the Arab countries to use them as the main guide in preparing

their respective national plans and to coordinate their actions with the Committee of Experts on Renewable Energy and Energy Efficiency (associated with the Council) and, with the help of a special methodology, monitor the implementation of the decisions of the above structure [3].

Table shows countries in the Arab region that have announced official strategic goals and adopted policies related to renewable energy. The Kingdom of Morocco ranks first in terms of completion of renewable electricity projects, followed by Egypt and Jordan.

Renewable Energy Goals. Total installed capacity of renewable energy sources in the Middle East

Country	Approved goals for increasing the share of renewable energy sources (% of total electricity production in the country)	Deadlines for achieving the goal	Total installed capacity of renewable energy sources (excluding hydropower) for 2022, MW
Jordan	10	2025	564.4
UAE	25	2030	356.6
Bahrain	10	2035	6
Algeria	27	2030	435.2
Tunisia	30	2030	282.8
Syria	30	2030	13
Sudan	20	2030	202.6
Iraq	11	2025	37
Oman	10	2025	25
Palestine	10	2025	18
Qatar	20	2030	43
Kuwait	15	2030	41
Lebanon	12	2025	30
Libya	10	2025	5
Egypt	20	2022	866
Kingdom of Morocco	52	2030	1260.8
Saudi Arabia	30	2040	92
Mauritania	20	2025	119.2
Yemen	15	2025	400

The growing competitiveness of renewable energy gives analysts hope that this trend will continue (Figure 5). Solar farms are cheaper, faster and safer to build and maintain than oil and gas power plants. A new solar power plant in the United Arab Emirates will produce electricity about two-thirds cheaper than gas and one-third cheaper than oil. Several countries in the region are talking about becoming exporters of renewable energy. Investors, however, still have reason to hesitate. First, Arab autocrats often promise more than they deliver. Take, for ex-

ample, Mohammed bin Salman, the de facto ruler of Saudi Arabia, who made renewable energy the basis of his economic reform plan. In 2018, the ruler and Japan's SoftBank announced the world's largest solar power project in the Saudi desert. However, after six months it was postponed.

Regional instability in the states of the Middle East region deters potential investors. The Iraqi Energy Minister blames the protests for derailing his plans to meet 20% of demand from renewable energy by 2030. Conflicts in neighboring countries have

cast doubt on Jordan's efforts to export solar energy to Lebanon. Egypt offered to buy solar power at above market prices to attract investors to Benban.

There is also a risk that, in the long term, lower oil prices will decrease countries' interest in solar energy. Saudi Arabia, for example, may choose to burn more oil for energy. The decline in revenues could force oil-producing states to suspend new solar projects. But such projects are largely driven by the private sector, and they still compare favorably with fossil fuels.

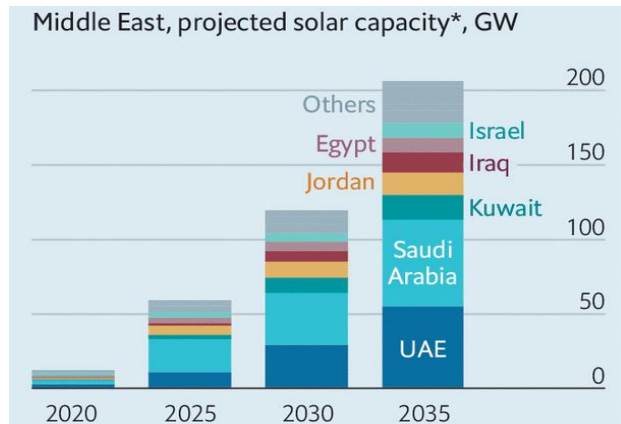


Figure 8. A graph demonstrating the planned growing competitiveness of renewable energy sources

Source: Per capita electricity generation by source, 2021. *Our World in Data*. Available from: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-electricity-source-stacked?country=USA~EGY~Europe~MAR~RUS~SAU~ARE> (accessed: 15.11.2022).

The expansion of the use of renewable energy sources requires the adoption of comprehensive measures, in accordance with national conditions and priorities, which, taking into account the degree of coordination and integration of policies between the relevant sectors and government bodies, will achieve the greatest efficiency of green energy both at the regional and international levels [10]. Nuclear energy is also included among the sources of renewable energy, however, the article itself predetermined the emphasis on solar and wind energy, as the least expensive and affordable for individuals. For example, 70% of energy in Yemen is generated by “domestic” solar panels of private households. The countries of the Middle East region will have to repeat the successful Soviet experience in implementing the GOELRO plan [14].

Jordan's refusal to sign a contract with Rosatom on the construction of a nuclear power plant indicates that this country has chosen solar energy as their priority. An obvious problem with using solar panels is desert

storms that cover the batteries with sand. An important step towards the development of solar and wind energy was the adoption of the Arab Strategy for the Development of the Use of Renewable Energy Sources for 2010–2030, adopted at the third session in Riyadh at the Arab Development Summit. The strategy provides a scientific and theoretical basis for the joint actions of the Arab states in the field of renewable energy sources.

Looking ahead to the future, Paddy Padmanathan of Acwa Power, a Saudi firm that manages renewable energy projects, argues, “Why shall we spend money extracting fuel from the earth and refining it instead of relying on God-given free sun and wind?”

The use of nuclear energy in the countries of the Middle East region causes serious concerns among the world community. Concerns about nuclear safety in the Middle East are limiting the spread of nuclear power. For example, Saudi Arabia and the UAE are concerned about possible terrorist attacks. First of all, this raises the issue of nuclear security, i.e., rapid measures to prevent and detect malicious acts such as theft, sabotage, unauthorized possession and illegal transfer. But there is also the issue of security, i.e. ensuring the operability of nuclear installations, preventing accidents or limiting their consequences. The countries of the Middle East are concerned about the availability of nuclear material for terrorist organizations, which undermines their desire to develop nuclear power in peacetime. The UAE, Turkey, Saudi Arabia, Egypt and Jordan import most of their fissile material for their current programs, and this raises the issue of dependence on other countries. In addition, the region is prone to frequent earthquakes (especially in Iran and Turkey), high temperatures, frequent terrorist attacks, and violent geopolitical disputes. When an earthquake measuring 7.7 on the Richter scale hit Iran in 2013, the disaster caused cracks in the concrete at the Bushehr nuclear power plant. Solar and wind power do not depend of earthquakes, unlike sandstorms. It is completely safe and does not create waste.

Any nuclear leak in the Persian Gulf would be a major problem for those countries dependent on seawater desalination. And finally, the Middle East, with its relatively late start in the development of nuclear energy, suffers from a shortage of qualified specialists and a belated development of related technologies. The problems of using atomic energy are of a political nature and are affiliated with the interests of major world powers. Of course, it is beneficial for Rosatom to build nuclear power plants in the region, which made it possible to strengthen Russia's influ-

ence on the region, however, our rivals use other arguments to gain a foothold in the countries of the Middle East region [8]. The issues of using nuclear reactors in the countries of the Middle East will be looked in more detail in the next article.

Conclusion

The presented materials make it possible to evaluate both the economic and political effects of the introduction of solar and wind power plants in the countries of the Middle East region. By decision of the Executive Office of the Arab Council of Ministers of Electricity of the League of Arab States, the Guiding Principles for Arab Countries on Renewable Energy Sources “Model of National Plans for Renewable Energy Sources” were adopted. The Arab countries use them as the main guide in preparing their respective national plans and coordinate their actions with the Committee of Experts on Renewable Energy and Energy Efficiency.

The article shows that systems of solar panels and storage batteries are capable of providing up to seventy percent of the needs of the country's population for electrical energy. In conditions of strong sun and a favorable prevailing and dominant winds (windrose diagram), small solar panels and wind turbines located in private houses are ways to solve the global state problems of saturating the country with energy. Numerous programs of the countries of the Middle East region for the development of solar and wind energy indicate the correctness of their chosen strategy. The Russian Federation undoubtedly has the necessary technological resources to help the countries of the Middle East region in the development of solar and wind energy.

References

1. Zhiltsov SA, Karpushin AA. Use of tropical helios solar panels for stand-alone power supply to consumers. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;18(2): 266–274. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-2-266-274>

Жильцов С.А., Карпушин А.А. Использование ге-лиотропических солнечных панелей для автономного электроснабжения потребителей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 2. С. 266–274. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2017-18-2-266-274>

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

Лачуга Ю.Ф., Годжаев З.А., Редько И.Я. Создание и применение мобильных многофункциональных энерготехнологических комплексов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 15–22. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-23-29>

3. Chang V, Chen Y, Zhang ZJ, Xu Q, Baudier P, Liu BS. The market challenge of wind turbine industry-renewable energy in PR China and Germany. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021;166(1):120631. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120631>

4. Statistical review of world energy. Full report 2021. 70th ed. London; 2021.

5. Abdeldayem M, Aldulaimi S. Entrepreneurial finance and crowdfunding in the Middle East. *International Journal of Organizational Analysis*. 2021. <https://doi.org/10.1108/IJOA-03-2021-2684>

6. Abdeldayem M, Mohamed M, Al D. Predicting crowdfunding economic success in the Gulf Cooperation Council. *International Journal of Engineering Business Management*. 2022;14(14):184797902210744. <https://doi.org/10.1177/18479790221074477>

7. Nastasi B, Markovska N, Puksec T, Duic N, Foley AM. Renewable and sustainable energy challenges to face for the achievement of Sustainable Development Goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;157: 112071. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112071>

8. Ermakov DN, Khusnulin RK, Kazenkov OYu. Influence of climatic conditions of Russia and the countries of the near east on lighting equipment. *Light and Engineering*. 2018;26(4):76–80. <https://doi.org/10.33383/2018-088>

9. Zhao J, Sinha A, Inuwa N, Wang Y, Murshed M, Abbasi K. Does structural transformation in economy impact inequality in renewable energy productivity? Implications for sustainable development. *Renewable Energy*. 2022;189: 853–864. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.050>

10. Raza MY, Wasim M, Sarwar MS. Development of renewable energy technologies in rural areas of Pakistan. *Energy Source A: Recovery, Utilization, Environ Effects*. 2020;42(6):740–760. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1588428>

11. World Energy Outlook 2017. International Energy Agency; 2017.

12. Khan SAR, Quddoos MU, Akhtar MH, Akhtar MH, Rafique A, Hayat M, Gulzar S, Yu Z. Re-investigating the nexuses of renewable energy, natural resources and transport services: a roadmap towards sustainable development. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(9): 13564–13579. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16702-4>

13. Samour A, Baskaya MM, Tursoy T. The impact of financial development and FDI on renewable energy in the UAE: a path towards sustainable development. *Sustainability*. 2022;14(3):1208. <https://doi.org/10.3390/su14031208>

14. Vorotnitsky VE. State Electrification Plan of Russia – an example of a systematic approach to the long-term development of the national electric power industry. *RUDN Journal*

of Engineering Researches. 2020;21(4):290–301. (In Russ.)
<http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-290-301>

Воротницкий В.Э. План ГОЭЛРО – образец системного подхода к долгосрочному развитию отече-

ственной электроэнергетики // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 290–301.
<http://doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-4-290-301>

About the authors

Sergei A. Kupreev, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8657-2282, Scopus Author ID: 57201885865, eLIBRARY SPIN-code: 2287-2902; kupreev-sa@rudn.ru

Oleg E. Samusenko, Ph.D. of Technical Sciences, Head of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8350-9384, Scopus Author ID: 57201881755, eLIBRARY SPIN-code: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

Dmitry N. Ermakov, Dr. of Political Sciences, Dr. of Economics, Ph.D. of Historical Sciences, Professor, Professor of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0811-0058, Scopus Author ID: 56610014800, eLIBRARY SPIN-code: 6835-3155; ermakov-dn@rudn.ru

Evgeny V. Kuznetsov, Doctor of Sciences (Eng.), Professor, General Director of the Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh, 3 Vvedensky St, bldg 1, Moscow, 117342, Russian Federation; Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3530-478X, Scopus Author ID: 55576831100, eLIBRARY SPIN-code: 4498-5669; bereg@niipolyus.ru

Oleg Yu. Kazenkov, Deputy Head of the Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh, 3 Vvedensky St, bldg 1, Moscow, 117342, Russian Federation; assistant of the Department of Nanotechnology and Microsystem Technology, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8893-4443, eLIBRARY SPIN-code: 1017-5314; o.kazenkov@gmail.com

Irina V. Burkova, Doctor of Sciences (Techn.), leading researcher, Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya St, Moscow, 117997, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4671-0847, eLIBRARY SPIN-code: 8047-7930; irbur27@gmail.com

Сведения об авторах

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; kupreev-sa@rudn.ru

Самусенко Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, директор департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8350-9384, Scopus Author ID: 57201881755, eLIBRARY SPIN-код: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

Ермаков Дмитрий Николаевич, доктор политических наук, доктор экономических наук, кандидат исторических наук, профессор, профессор департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-0811-0058, Scopus Author ID: 56610014800, eLIBRARY SPIN-код: 6835-3155; ermakov-dn@rudn.ru

Кузнецов Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор, НИИ «Полюс» имени М.Ф. Стальмаха, Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1; профессор кафедры нанотехнологии и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-3530-478X, Scopus Author ID: 55576831100, eLIBRARY SPIN-код: 4498-5669; bereg@niipolyus.ru

Казенков Олег Юрьевич, заместитель руководителя, НИИ «Полюс» имени М.Ф. Стальмаха, Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1; ассистент, кафедра нанотехнологии и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8893-4443, eLIBRARY SPIN-код: 1017-5314; o.kazenkov@gmail.com

Буркова Ирина Владимировна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова, Российская академия наук, Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65; ORCID: 0000-0002-4671-0847, eLIBRARY SPIN-код: 8047-7930; irbur27@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-157-165
EDN: BVXDPT
УДК 621.311

Научная статья / Research article

Положительный эффект распределения ветровых электростанций в электроэнергетической системе

О.Ю. Сигитов^{a,b}, С.А. Купреев^b, В.У. Мнацаканян^c

^aПАО «Мосэнерго», Москва, Российская Федерация

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

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

✉ OlegSigitov@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 1 декабря 2022 г.

Доработана: 22 января 2023 г.

Принята к публикации: 12 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

электроэнергетические системы,
баланс мощности, коэффициент
неравномерности, график нагрузки,
неоднородность электрической сети

Аннотация. Установленная мощность ветровых электростанций в составе электроэнергетических систем растет прогрессирующими темпами. В Российской Федерации принят комплекс законодательных мер, направленных на увеличение установленной мощности ветровых электростанций (ВЭС). Исследование посвящено оценке влияния ветровых электростанций на электроэнергетическую систему (ЭЭС). Рассмотрено воздействие распределения ВЭС по узлам энергосистемы в сравнении с одной ВЭС большой мощности (Ейск). На основании расчета суточного коэффициента неравномерности, коэффициента использования установленной мощности и неоднородности электрической сети сделаны следующие выводы: у ВЭС большой мощности суточная амплитуда колебаний мощности имеет большие значения, вплоть до номинальной мощности 3,4 ГВт; КИУМ системы ВЭС всегда будет ниже при сравнении с ВЭС большой мощности, размещенной в одном месте с наилучшим ветроэнергетическим потенциалом; распределение ВЭС по узлам ЭЭС повышает их жесткость (способность поддержания напряжения узла при изменении нагрузки) и, как следствие, надежность. Графическое изображение чувствительности 64-узловой схемы электрической сети 110–500 кВ демонстрирует увеличение количества жестких узлов.

Для цитирования

Сигитов О.Ю., Купреев С.А., Мнацаканян В.У. Положительный эффект распределения ветровых электростанций в электроэнергетической системе // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 157–165. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-157-165>



Positive impact of wind farms distribution in the electric power system

Oleg Yu. Sigitov^{a,b} , Sergei A. Kupreev^b , Victoria U. Mnatsakanyan^c 

^aJoint-Stock Company for Power and Electrification Mosenergo, Moscow, Russian Federation

^bRUDN University, Moscow, Russian Federation

^cNational Research Technological University “MISIS”, Moscow, Russian Federation

 OlegSigitov@gmail.com

Article history

Received: December 1, 2022

Revised: January 22, 2023

Accepted: February 12, 2023

Keywords:

power balance, unevenness factor, load curve, power grid heterogeneity

Abstract. Installed capacity of wind farms is growing rapidly in the electric power systems. The Russian Federation has adopted a set of legislative measures to increase wind farms (WF) installed capacity. The research focuses on assessing the impact of wind farms in electric power system (EPS). In particular, the wind farms distribution impact over electric power system nodes is considered in comparison with single high-capacity wind farm (Eysk). Based on the calculations of the daily unevenness factor, installed capacity utilization rate and grid heterogeneity, following conclusions are obtained: the high-capacity wind farm has a higher daily power fluctuation amplitude, up to a nominal capacity of 3.4 GW; installed capacity utilization rate of wind farms system will always be lower when compared to a high-capacity wind farm located in the same location with the best wind energy potential; wind farms distribution across EPS nodes increase their rigidity (the ability to maintain the node voltage as the load changes) and, as a result, their reliability. The graphical illustration of the sensitivity of a 64 node 110–500 kV power grid demonstrates the increase in the number of rigid nodes.

For citation

Sigitov OYu, Kupreev SA, Mnatsakanyan VU. Positive impact of wind farms distribution in the electric power system. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):157–165. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-157-165>

Введение

В современных энергосистемах решаются сложные стратегические задачи, в числе которых развитие электросетевой инфраструктуры, распределенной генерации, в том числе возобновляемых источников энергии, и снижение экологической нагрузки на окружающую среду. Существующие сценарии развития электроэнергетического комплекса в долгосрочной перспективе отличаются прогнозами энергопотребления и установленной мощностью различных типов электростанций. Сценарии прогноза по состоянию на 2019 г. учитывают три направления развития: консервативный, инновационный и энергопереход [1]. Отличие направлений состоит в выборе государственной энергетической политики и пути развития технологий при неизменной численности населения и среднегодовых темпах роста мирового валового внутреннего продукта (ВВП). При этом во всех сценариях отмечается наибольший прирост электростанций на основе возобновляе-

мых источников энергии. Наибольшее снижение демонстрируют угольные электростанции.

Ветровые электростанции (ВЭС) в настоящее время демонстрируют высокие темпы роста. В период с 2001 по 2021 г. установленная мощность ВЭС в мире выросла почти в 35 раз, с 24 до 837 ГВт [2]. За период 2010–2020 гг. мировая приведенная стоимость (LCOE) континентальных ВЭС снизилась на 56 % – с 0,089 до 0,039 долл. США/кВтч. Для наиболее дорогих оффшорных ВЭС снижение составило 48 % – с 0,162 до 0,084 долл. США/кВтч [3]. Ветроэнергетические установки (ВЭУ) в свою очередь активно развиваются в направлении увеличения их установленной мощности, которая достигает от 12 до 15 МВт при диаметре ротора ветровой турбины от 211 до 236 м¹. На 2014 г., по данным

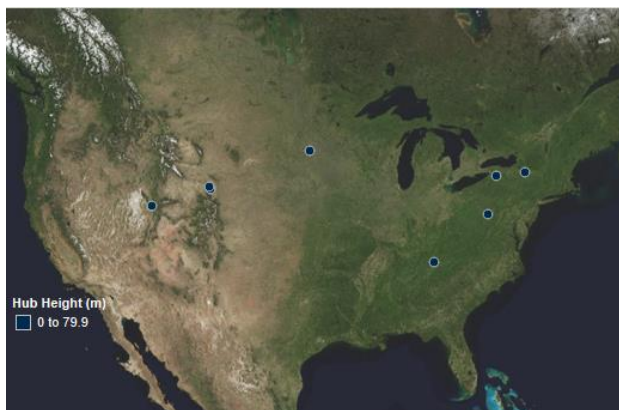
¹ V236-15.0

MW.

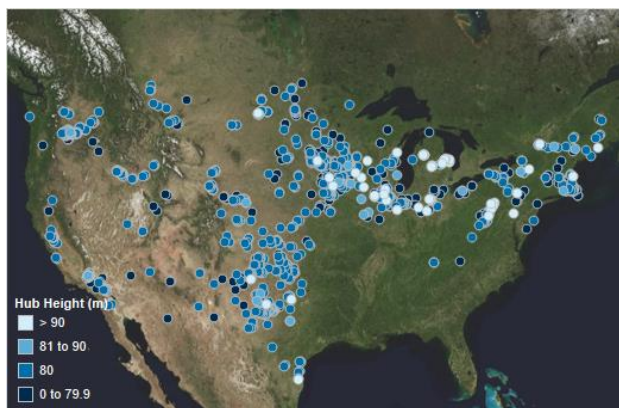
URL:

<https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW> (accessed: 12.07.2022); Haliade-X offshore wind turbine. URL: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore->

АWEА, средняя высота башни ветроэнергетической установки (ВЭУ) составила порядка 80 м (рис. 1)², что также способствует увеличению номинальной мощности и повышению коэффициента установленной мощности ВЭУ (вследствие увеличения скорости ветра с высотой).



а



б

Рис. 1. Высота башни ветроэнергетических установок в США (Hub Height) на 2000 (а) и 2014 (б) гг., м
Figure 1. Tower height of wind turbines in the USA in 2000 (a) and 2014 (б), m

Указанное развитие технологий ветровых электростанций приводит к росту их установленной мощности в энергосистеме. При этом основная проблема, связанная с колебаниями генерации ВЭС, остается актуальной во всех энергосистемах мира. С другой стороны, рост установленной мощности ВЭС в энергосистеме в некоторой сте-

пени снижает негативный эффект ВЭС за счет их распределения по энергосистеме. Такое снижение негативного эффекта можно рассмотреть при сравнении ВЭС большой мощности и системы ВЭС. Под системой ветровых электростанций понимается совокупность ветровых электростанций и/или отдельных ветровых турбин, находящихся на удаленном расстоянии друг от друга и подключенных к электроэнергетической системе.

1. Преимущества рассредоточения ВЭС в энергосистеме

Реальное изменение нагрузки ВЭС можно определить на основе данных эксплуатации. Изменение нагрузки следует определять по всем источникам ВЭС, входящих в энергосистему. Аналогичный подход используется при определении диспетчерского графика генерации энергосистем, когда при регулировании нагрузки электростанций ориентируются на изменение общей нагрузки энергосистемы, а не отдельных потребителей. На рис. 2 продемонстрирован эффект наложения графиков генерации ВЭС по 5-минутным измерениям в энергосистеме Австралии³. К энергосистеме подключены 69 ВЭС от 20 до 452 МВт суммарной установленной мощностью 8587 МВт. При этом нагрузка энергосистемы составляет около 27 ГВт.

Из рисунка видно, что электростанции имеют различные графики генерации и, как следствие, коэффициенты использования установленной мощности (КИУМ) в течение суток. КИУМ современных континентальных ВЭС составляет порядка 30–35 %, а оффшорных ВЭС – 35–55 %. В международном отчете по ветроэнергетике за 2021 г. прогнозируется увеличение КИУМ ВЭС в интервале 32–58 % к 2050 г. для континентальных ВЭС и в интервале 43–60 % к 2050 г. для оффшорных ВЭС [4].

КИУМ ВЭС определяется как отношение фактической выработки к выработке при использовании всей установленной мощности в течение рассматриваемого периода времени, то есть теоретической выработке [5]:

$$\text{КИУМ}_{\text{ВЭС}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{факт}}}{\mathcal{E}_{\text{теор}}}, \quad (1)$$

wind/haliade-x-offshore-turbine (accessed: 12.07.2022); DEC Rolls Out 13 MW Offshore Wind Turbine. URL: <https://www.offshorewind.biz/2022/02/23/dec-rolls-out-13-mw-offshore-wind-turbine/> (accessed: 12.07.2022).

² Американская ассоциация ветроэнергетики. URL: <https://www.awea.org> (дата обращения: 12.07.2022).

³ Aneroid Energy. URL: <https://anero.id/energy> (дата обращения: 12.07.2022).

где $\mathcal{E}_{\text{факт}}$ – фактическая выработка электрической энергии ВЭС в течение рассматриваемого периода времени, МВт·ч; $\mathcal{E}_{\text{теор}}$ – теоретическая выработка электрической энергии ВЭС при использовании всей установленной мощности в течение рассматриваемого периода времени, МВт·ч.

Для удобного представления результатов расчета применяется метод повторяемости величины в заданных интервалах. Повторяемость устанавливает отношение числа случаев со значениями, входящими в заданный интервал, к общему числу случаев. Повторяемость КИУМ ВЭС определяется по формуле

$$t(\Delta\text{КИУМ}_{\text{ВЭС } j}) = \frac{m}{n} 100\%, \quad (2)$$

где $t(\Delta\text{КИУМ}_{\text{ВЭС } j})$ – повторяемость КИУМ ВЭС в интервалах $\Delta\text{КИУМ}_{\text{ВЭС } j}$, %; m – число значений

коэффициента использования установленной мощности $\text{КИУМ}_{\text{с.ВЭС } i}$ в рассматриваемом интервале $\Delta\text{КИУМ}_{\text{ВЭС } j}$, о.е.; n – общее число значений коэффициента использования установленной мощности $\text{КИУМ}_{\text{ВЭС } i}$ в течение рассматриваемого периода времени, то есть во всех интервалах $\Delta\text{КИУМ}_{\text{ВЭС } j}$, о.е.; j – количество интервалов; i – количество измерений скорости ветра в рассматриваемом периоде времени (неделя, месяц, год).

В расчетах КИУМ определяется при каждом измерении скорости ветра, то есть на единичном участке времени. Поэтому интервалы $\Delta\text{КИУМ}_{\text{ВЭС } j}$ показывают отношение фактической мощности ВЭС к установленной мощности ВЭС, тем самым отражая продолжительность различных режимов работы с определенной мощностью. Наилучшим условием является наибольшее значение $t(\Delta\text{КИУМ}_{\text{ВЭС } j})$ в наибольшем интервале $\Delta\text{КИУМ}_{\text{ВЭС } j}$.

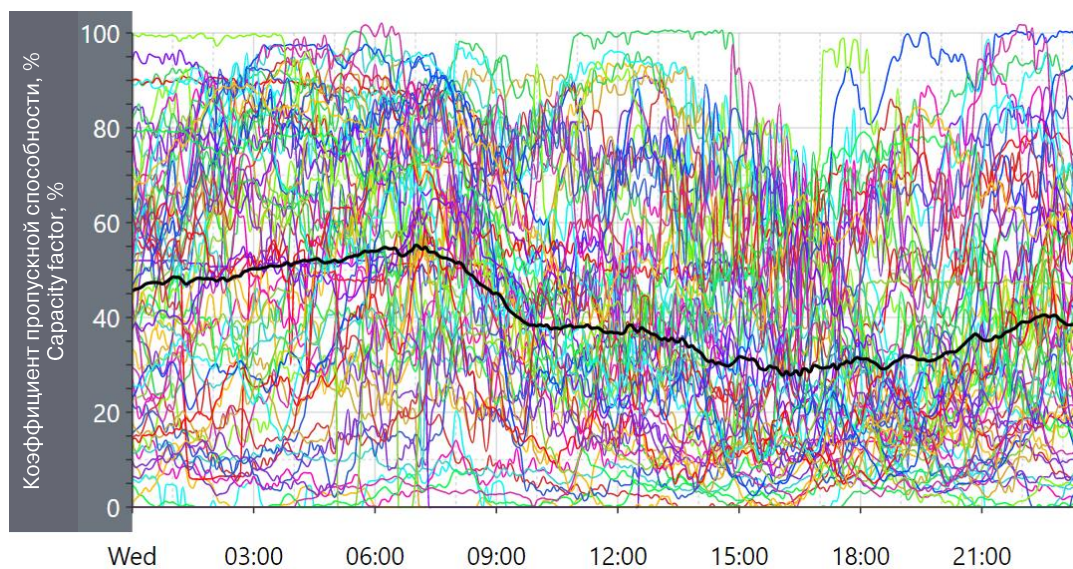


Рис. 2. Изменение мощности ВЭС 25.05.2022 г.
Figure 2. Wind farms power generation changes for 25.05.2022

Формирование и оценка графиков электрических нагрузок являются важными задачами в вопросах диспетчерского управления. Графики электрических нагрузок ЭЭС отражают колебания спроса на электрическую энергию во времени [6] и, соответственно, определяют режимы работы электрических станций в зависимости от их типа. В соответствии с указанными графиками определяются время пуска и останова генерирующих объектов, экономически эффективный режим работы электро-

энергетической системы, планируется проведение ремонтных работ и др.

В работе О.П. Балашова⁴ описаны показатели, характеризующие графики нагрузки ЭЭС, такие как коэффициент активной мощности, коэффициент загрузки по активной мощности, коэффициент

⁴ Балашов О.П. Электроснабжение: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. Рубцовск, 2014. 126 с.

суточной неравномерности потребления, коэффициент межнедельной неравномерности, коэффициент летнего снижения максимальных нагрузок и др. Данные параметры позволяют рационально интегрировать систему ВЭС в ЭЭС, помогая в решении задач при проектировании и эксплуатации объектов электроэнергетической системы.

Например, суточный коэффициент неравномерности применяется для анализа колебаний графика генерации ВЭС (системы ВЭС) в течение заданного периода времени. По значениям коэффициента в течение рассматриваемого периода времени можно оценить возможность регулирования существующих традиционных электростанций и определить мероприятия для повышения их диапазона регулирования [7].

Суточный коэффициент неравномерности показывает изменение графика генерации ВЭС (амплитуды) в течение суток:

$$K_{н\text{сут.}i} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{уст.вэс}}}, \quad (3)$$

где P_{\min} – минимальная мощность ВЭС в течение суток, МВт; P_{\max} – максимальная мощность ВЭС в течение суток, МВт; $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность ВЭС, МВт.

Повторяемость суточного коэффициента неравномерности определяется по формуле

$$t(\Delta K_{н\text{сут.}j}) = \frac{m}{n}, \quad (4)$$

где $t(\Delta K_{н\text{сут.}j})$ – повторяемость суточного коэффициента неравномерности ВЭС в интервалах $\Delta K_{н\text{сут.}j}$, о.е.; m – число значений суточного коэффициента неравномерности $K_{н\text{сут.}i}$ в рассмат-

риваемом интервале $\Delta K_{н\text{сут.}j}$, о.е.; n – общее число значений суточного коэффициента неравномерности $K_{н\text{сут.}i}$ в течение рассматриваемого периода времени, то есть во всех интервалах $\Delta K_{н\text{сут.}j}$, о.е.; j – количество интервалов; i – количество суток в рассматриваемом периоде времени (неделя, месяц, год).

Суточный коэффициент неравномерности эффективно использовать при выборе состава включенного генерирующего оборудования регулирующих станций на сутки вперед, то есть при выборе необходимого объема регулирования. При этом наилучшими условиями являются

$$t(\Delta K_{н\text{сут.}j}) \rightarrow \min, \text{ при } \Delta K_{н\text{сут.}i} \rightarrow \max. \quad (5)$$

Таким образом, по значениям повторяемости суточного коэффициентов неравномерности возможно оценить необходимость или достаточность в ЭЭС высокоманевренных электростанций и/или накопителей электрической энергии с диапазоном и скоростью регулирования, способными в минимальное время набрать недостающую прогнозируемую мощность.

2. Результаты сравнения системы ВЭС и ВЭС большой мощности

Для подтверждения эффективности распределения ветровых электростанций в удаленных друг от друга местах (на расстояние, при котором временные графики скорости ветра существенно различаются, то есть системы ВЭС) далее представлены результаты сравнительного расчета ВЭС большой мощности и системы ВЭС.

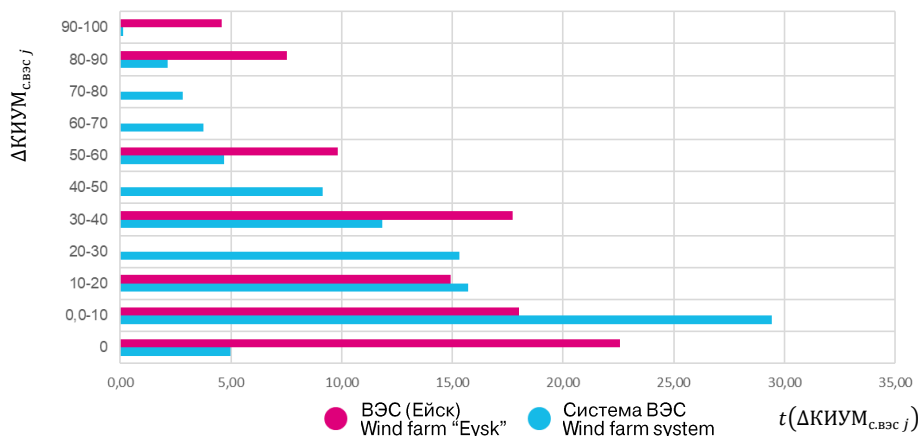


Рис. 3. Повторяемость КИУМ ВЭС Ейска и системы ВЭС
 Figure 3. Repeatability of installed capacity utilization rate for wind farm (WF) "Eysk" and wind farm system

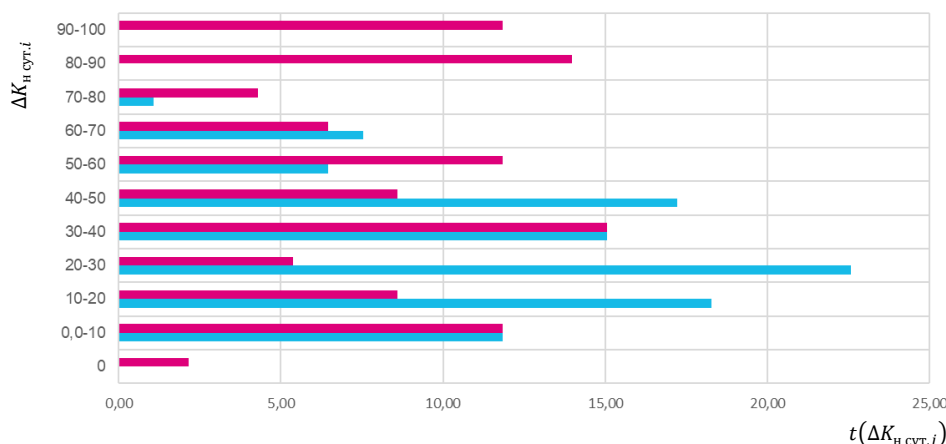


Рис. 4. Повторяемость суточного коэффициента неравномерности ВЭС Ейска и системы ВЭС
Figure 4. Repeatability of daily unevenness factor for wind farm “Eysk” and wind farm system

Расчеты проводятся на основании трехчасовых измерений средней скорости ветра за двухминутный интервал времени на высоте 10–12 м для населенных пунктов⁵: Ейск, Таганрог, Константиновск, Маргаритово, Должанская, Новороссийск, Геленджик, Туапсе, Ставрополь, Красная Поляна. Установленная мощность системы ВЭС составляет 3,4 ГВт. ВЭС большой мощности (аналогично системе ВЭС составляет 3,4 ГВт) располагается в населенном пункте Ейск.

Выработка электрической энергии за рассматриваемый период системы ВЭС составляет 622 ГВт·ч, а выработка ВЭС Ейск – 752 ГВт·ч, что на 17 % больше. КИУМ системы ВЭС – 25 %, а КИУМ ВЭС Ейск – 30 %, что аналогично выработке больше на 17 %. На рис. 3 показано, что для ВЭС Ейск характерны высокие показатели повторяемости КИУМ в наибольших интервалах (90–100, 80–90, 50–60, 30–40).

Указанное выше сравнение параметров показывает преимущество одной ВЭС Ейск в сравнении с системой ВЭС. Это объясняется тем, что КИУМ населенного пункта Ейск значительно отличается от остальных населенных пунктов, образующих систему ВЭС.

Тем не менее у параметра, характеризующего колебания генерации ВЭС, наблюдаются лучшие значения для системы ВЭС. Повторяемость суточного коэффициента неравномерности представлена на рис. 4. У ВЭС Ейск отмечается высокая повторяемость наихудших интервалов (от 70–80 до 90–100), то есть значительное колебание мощности ВЭС в течение суток, включая амплитуду 3,0–3,4 ГВт.

3. Влияние распределение ВЭС на неоднородность электрической сети

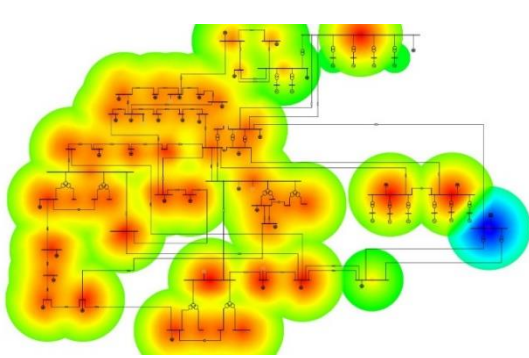
Расположение ВЭС в узлах ЭЭС, помимо изменения баланса генерирующих мощностей, приведет и к изменению конфигурации электрической сети и, как следствие, ее неоднородности [8]. Неоднородность ЭЭС определяется различным сочетанием параметров элементов ЭЭС (линий электропередачи, трансформаторов, нагрузки, источников генерации). Неоднородность приводит к появлению чувствительных узлов ЭЭС, в которых изменение нагрузки может привести к значительным отклонениям напряжения, а значит, в некоторых случаях к нарушению допустимых отклонений.

В связи с этим, для определения влияния установки ВЭС в узлах ЭЭС применяется метод оценки неоднородности сети, основанный на определении чувствительных узлов – жестких и сенсорных [9–10]. Жестким считается узел, напряжение которого изменяется меньше всего при изменении его нагрузки на единицу, то есть узел с хорошими возможностями поддержания напряжения. Узлы с противоположными свойствами называют сенсорными. Данный метод основан на анализе уравнения небаланса реактивной мощности по модулю напряжения, которое в результате преобразований можно представить в виде

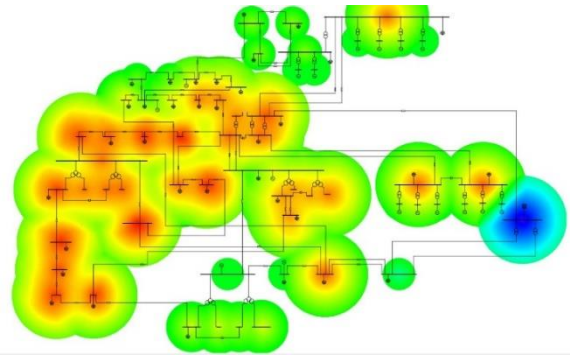
$$\frac{\partial W_{Qi}}{\partial U_i} = U_i(2b_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N b_{ij}), \quad (6)$$

где $\partial W_{Qi}/\partial U_i$ – производная реактивной мощности по модулю напряжения; U_i – номинальное напряжение i -го узла; $U_i = \text{const}$, b_{ii} – собственная проводимость i -го узла; b_{ij} – взаимная проводимость узлов i и j .

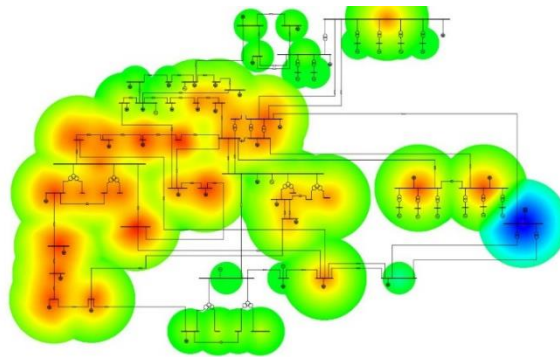
⁵ Расписание погоды. URL: <https://tr5.ru> (дата обращения: 12.07.2022).



Режим без ВЭС / Electric power system mode without WF

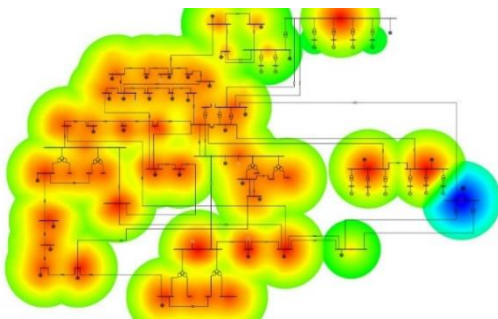


ВЭС 50 % / Electric power system mode with 50% WF generation



ВЭС 100 % / Electric power system mode with 100% WF generation

Рис. 5. Графическое изображение чувствительности узлов электрической сети 110–500 кВ с системой ВЭС
Figure 5. The graphical illustration of 64 nodes sensitivity in 110–500 kV electric power system with a wind farm system



Режим без ВЭС / Electric power system mode without WF



ВЭС 50 % / Electric power system mode with 50% WF generation



ВЭС 100 % / Electric power system mode with 100% WF generation

Рис. 6. Графическое изображение чувствительности узлов электрической сети 110–500 кВ с ВЭС Ейска
Figure 6. The graphical illustration of 64 nodes sensitivity in 110–500 kV electric power system with the wind farm "Eysk"

Наибольшее приращение напряжения будет соответствовать наиболее сенсорному узлу. В качестве примера рассмотрена 64-узловая схема электрической сети классом напряжения 10, 110, 220, 500 кВ. На рис. 5 и 6 представлено графическое изображение чувствительности узлов электрической сети: от наиболее сенсорного (красный, желтый) к наиболее жесткому (зеленый, синий). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что распределение источников генерации в узлах нагрузки, в частности размещение ВЭС, положительно сказывается на изменении отклонения напряжения в электрической сети.

Заключение

Распределение ВЭС оказывает влияние на график генерации ЭЭС. Чем больше установленная мощность ВЭС, тем значительнее будет влияние, однако его отрицательную составляющую можно снизить при помощи распределения ВЭС на удаленное друг от друга расстояние (система ВЭС) и выбрав оптимальные места установки. В таком случае система ВЭС может оказать и положительное влияние, снижая суточный коэффициент неравномерности графика генерации ЭЭС. В представленном примере в отличие от системы ВЭС, у ВЭС Ейск большой мощности суточная амплитуда колебаний мощности имеет большие значения, вплоть до номинальной мощности 3,4 ГВт.

КИУМ системы ВЭС всегда будет ниже при сравнении с ВЭС большой мощности, размещенной в одном месте с наилучшим ветроэнергетическим потенциалом. Очевидно, что это связано с отсутствием абсолютно одинаковых мест по ветроэнергетическим ресурсам. КИУМ системы из шести ВЭС в представленных расчетах составил 25 %, а КИУМ ВЭС большой мощности – 30 %, что больше на 17 %.

Так как ветроэнергетика представляет собой основу распределенной генерации, то в сложившейся ситуации топологии ЭЭС (большое количество линий электропередачи различных классов напряжения, трансформаторов, нагрузки, источников генерации) это является преимуществом для обеспечения надежных услуг в области электроснабжения. Достигается поставленная задача путем расположения ВЭС в чувствительных узлах ЭЭС, тем самым повышая их жесткость и, как следствие, надежность.

Список литературы / References

1. Brilliantova VV, Galkin YuV, Galkina AA, Grigoriev LM, Grushevenko DA, Grushevenko EV, Dunaeva NV, Kapitonov SA, Kapustin NO, Kulagin VA, Kozina EO, Makarov AA, Malakhov VA, Melnikova SI, Melnikov YuV, Mironova IYu, Ovchinnikova IN, Perdero AA, Ryapin IYu, Khokhlov AA, Yakovleva DD. *Energy development forecast of the world and Russia 2019* (A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagin, eds.). Moscow; 2019. 210 p. (In Russ.)

Бриллиантова В.В., Галкин Ю.В., Галкина А.А., Григорьев Л.М., Грушевенко Д.А., Грушевенко Е.В., Дунаева Н.В., Капитонов С.А., Капустин Н.О., Кулагин В.А., Козина Е.О., Макаров А.А., Малахов В.А., Мельникова С.И., Мельников Ю.В., Миронова И.Ю., Овчинникова И.Н., Пердеро А.А., Ряпин И.Ю., Хохлов А.А., Яковлева Д.Д. Прогноз развития энергетики мира и России 2019: монография / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. М., 2019. 210 с.

2. *Global wind report 2022*. Brussels: Global Wind Energy Council; 2022. 111 p.

3. *Renewable power generation costs in 2020*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2021.

4. *Global wind report 2021*. Brussels: Global Wind Energy Council; 2021. 15 p.

5. Sigitov O.Yu., Chemborisova N.Sh. Wind farms generation deviation in electric power system. *Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering* (vol. 3). New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2021. <http://doi.org/10.1109/REEPE51337.2021.9388016>

6. Production, transmission and distribution of electrical energy. In: Gerasimov VG, Dyakov AF, Ilyinsky NF, Labuntsov VA, Morozkina VP, Orlova IN, Popov AI, Stroeve VA. (eds.) *Electrotechnical Reference Book* (vol. 3). Moscow: MPEI Publ.; 2009. (In Russ.)

Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под ред. В.Г. Герасимова, А.Ф. Дьякова, Н.Ф. Ильинского, В.А. Лабунцова, В.П. Морозкина, И.Н. Орлова, А.И. Попова, В.А. Строева. М.: МЭИ, 2009. 964 с.

7. Sigitov OYu. *Development of a method for the rational placement of wind power plants in the electric power system* (abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences). Moscow; 2022. (In Russ.)

Сигитов О.Ю. Разработка метода рациональной расстановки ветровых электростанций в ветроэнергетической системе: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2022. 20 с.

8. Sigitov OYu, Chemborisova NSh, Chernenkov ID. Reliability study in operating mode control of modern power systems. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2021;(2):40–46. (In Russ.)

Сигитов О.Ю., Чемборисова Н.Ш., Черненко И.Д. Анализ надежности при управлении режимами современных электроэнергетических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2021. № 2. С. 40–46.

9. Chemborisova N. Assessment of the impact of the rigidity of nodes on the operating reliability of EPSS.

E3S Web of Conferences. Rudenko International Conference “Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems”, Tashkent, 23–27 September 2019. 2019;139:01070. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/201913901070>

10. Sigitov OYu, Chemborisova NSh, Chernenkov ID. Formalized analysis of reliability in the management of modes of electric power systems. *E3S Web of Conferences. Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems”*. 2020;216:01008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601008>

Сведения об авторах

Сигитов Олег Юрьевич, кандидат технических наук, руководитель проектов СЭТР, Инженерное управление, ПАО «Мосэнерго», Российская Федерация, 119526, Москва, пр-кт Вернадского, д. 101, корп. 3; ассистент кафедры энергетического машиностроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0009-0007-8541-4542, Scopus Author ID: 57216623025, eLIBRARY SPIN-код: 9915-2001; OlegSigitov@gmail.com

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

Мнацакян Виктория Умедовна, доктор технических наук, профессор кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-код: 8693-8313; artvik@bk.ru

About the authors

Oleg Yu. Sigitov, PhD, project manager, Expertise and Technical Development Service, Joint-Stock Company for Power and Electrification Mosenergo, 101 Vernadskogo Prospekt, bldg 3, Moscow, 119526, Russian Federation; assistant of the Department of Power Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0007-8541-4542, Scopus Author ID: 57216623025, eLIBRARY SPIN-code: 9915-2001; OlegSigitov@gmail.com

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

Victoria U. Mnatsakanyan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mining Equipment, Transport and Mechanical Engineering, National Research Technological University “MISIS”; 4 Leninskii Prospekt, bldg 1, Moscow, 119049, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-code: 8693-8313; artvik@bk.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-166-176

EDN: BNFZFA

UDC 629.5.083.5

Research article / Научная статья

Kinematic surfaces with congruent generatrix curves

Sergey N. Krivoshapko

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ sn_krivoshapko@mail.ru

Article history

Received: December 21, 2022

Revised: February 22, 2023

Accepted: February 26, 2023

Keywords:

rotative surface, spiroidal surface,
translation surface, surface of congruent
sections

Abstract. Kinematic surfaces of general type are considered to include rotational, spiroidal and translation surfaces. The author indicates that a class of kinematic surfaces under consideration also comprises instances of eleven other classes. A classification of general kinematic surfaces with congruent formations is compiled, with the most well-known specific kinematic surfaces indicated in addition to classes and groups containing surfaces formed by a rigid curve as it moves in space. The classification is based on the methods of forming the kinematic surfaces: (1) a stationary and mobile axoid with a generatrix curve rigidly connected to it; (2) a stationary directrix curve and a mobile rigid generatrix curve sliding along the directrix curve with the curves not necessarily having a common point; (3) the translation surfaces of one plane curve along another, with the curves sharing a common sliding point. The suggestion of organising a class of kinematic surfaces of general type does not imply their exception from the other classes of surfaces. The term “kinematic surfaces of general type” is used when it is necessary to show the wider group of surfaces but not to enumerate all classes with examined surfaces. The application of kinematic surfaces in construction, mechanical engineering is described, the explanation of some natural phenomena and processes in electrodynamics, fluid dynamics and astrophysics for the simulation of spiral objects is given.

For citation

Krivoshapko SN. Kinematic surfaces with congruent generatrix curves. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):166–176. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-166-176>

Кинематические поверхности с конгруэнтными образующими кривыми

С.Н. Кривошапко

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ sn_krivoshapko@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 21 декабря 2022 г.

Доработана: 22 февраля 2023 г.

Принята к публикации: 26 февраля 2023 г.

Аннотация. Общеизвестно, что кинематические поверхности общего вида полностью включают в себя ротативные и спироидальные поверхности, а также поверхности переноса. Показано, что класс рассматриваемых кинематических поверхностей включает в себя также



Ключевые слова:

ротативная поверхность, спироидальная поверхность, поверхность переноса, поверхности конгруэнтных сечений

представителей одиннадцати других классов. Составлена классификация кинематических поверхностей общего вида с конгруэнтными образующими, где помимо классов и групп, содержащих поверхности, образованные жесткой кривой при ее движении в пространстве, указаны наиболее известные конкретные кинематические поверхности. При этом учитывались способы образования кинематических поверхностей: 1) наличие неподвижного и подвижного аксоида с жестко связанной с ним образующей кривой; 2) неподвижной направляющей кривой и образующей подвижной жесткой кривой, скользящей вдоль направляющей кривой, причем кривым необязательно иметь общую точку; 3) поверхности переноса одной плоской кривой вдоль другой, причем кривые имеют одну общую точку скольжения. Предложение по организации класса кинематических поверхностей общего вида не подразумевает их исключения из других классов поверхностей. Термин «кинематические поверхности общего вида» используется, когда нужно показать более широкую группу поверхностей, а не перечислять все классы поверхностей, куда входят исследуемые поверхности. Описано применение кинематических поверхностей в строительстве, машиностроении, дано объяснение некоторых природных явлений и процессов в электродинамике, динамике жидкости и астрофизике для моделирования спиральных объектов.

Для цитирования

Krivoshapko S.N. Kinematic surfaces with congruent generatrix curves // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 166–176. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-166-176>

Introduction

The paper [1] allocates all analytical surfaces into 38 classes. The same surface can be included in several classes. For example, a spherical surface is in the class of rotational surfaces, in the class of constant Gaussian curvature surfaces, or constant mean curvature surfaces, or in the sub-class of cyclic rotational surfaces, or Weingarten surfaces, etc.

Kinematic surfaces of general type are identified as a separate class of surfaces. The generating curve of a *kinematic surface of general type*, moving to each subsequent position, may retain a certain character of movement, but the motion parameters, positions of axes and directions of infinitesimally small summands of motions of the generating line are continuously changing. These motions may be of the following types:

- (1) translational motion of alternating direction;
- (2) rotational motion with continuously alternating position in space and direction of the axis of rotation;
- (3) screw motion with continuously alternating position and direction of the screw axis, and continuously alternating screw motion parameter.

Depending on the motion type of the generating curve, kinematic surfaces of general type may be

classified into (1) translation surfaces; (2) rotational surfaces; (3) spiroidal surfaces (Figure 1).

Sometimes kinematic surfaces of a general type are called congruent section surfaces. A *congruent section surface* refers to a surface that contains a continuous uniparametric family of plane lines. The surface is derived from the motion of a given rigid plane line (generatrix) [2]. For the first time, the distinguishing of congruent section surfaces into a separate class was suggested by famous scientist, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Ivan I. Kotov (MAI, Moscow) in 1973.

The distinction of surfaces into separate classes simplified the presentation of construction methods of these surfaces by means of computer graphics and descriptive geometry of surfaces [3].

Kinetic surfaces and structures constitute a special group of structures that are closer to transforming structures. In recent years, kinetical facade surfaces have appeared: architectural facades which dynamically change, transforming buildings from static monoliths into permanently moving surfaces [4]. They are not included in the class of surfaces under consideration. The group of kinetic surfaces can comprise torse surfaces obtained by parabolic bending of a plane workpiece [5].

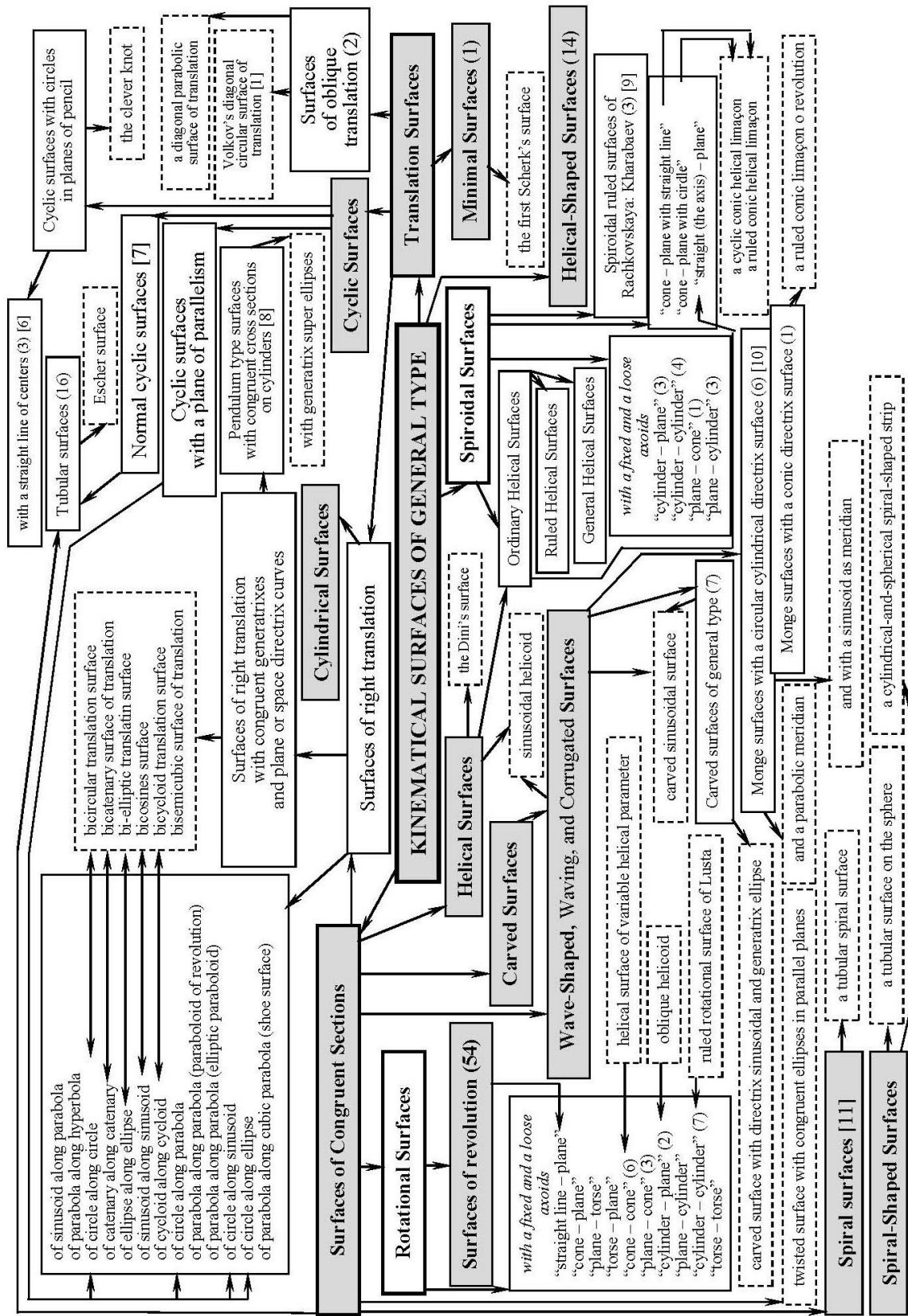


Figure 1. Distribution of kinematical surfaces of general type among the classes, the sub-classes, the groups, and the sub-groups

1. Purpose of the study

The purpose of the study is to search for the main published papers where kinematic surfaces are studied. Then, for ease of reference, to try and divide them into subclasses, groups and sub-groups and, finally, to classify them graphically, as it was done, for example, for linear surfaces [12], or rotational and translation surfaces [13].

The proposal for organizing a class of kinematic surfaces of general type does not imply their exclusion from other classes of surfaces. The term “kinematic surfaces of general type” is used when it is necessary to indicate a wider group of surfaces rather than to list all the surface classes which include the surfaces under study.

Tatiana Yu. Alaeva [14] believes that “the difficulty of classifying surfaces consists not only in their infinite diversity and complexity of geometrical characteristics, but primarily in the multiplicity and variety of ways of forming and defining surfaces, between which it is sometimes complicated to find something in common. Therefore, it is not possible to classify surfaces based on how they are defined. It is incorrect to divide surfaces into kinematic, wireframe, graphical, topographic, etc. These features describe the way the surface is defined, not the surface itself. Any surface can be defined in an unlimited number of ways. The basis for classifying surfaces can only be their geometric features.”

However, despite the different opinions on classification issues, the method, based on the surface formation of a rigid (congruent) plane curve moving in space, will be considered as a basis for the classification of kinematic surfaces.

2. Explanation of the symbols

The darkened frames indicate the surface classes commonly accepted in practice. The non-darkened frames with an outline in the form of a solid line indicate subclasses, groups and sub-groups of surfaces. In the dotted outline frames, the names of the specific surfaces are given. The frames with bold outline specify the “Translation surfaces” class and two subclasses of “Rotational surfaces” and “Spiroidal surfaces”, which are fully included in the “Kinematic surfaces of general type” class. The instances of other classes represented in the darkened frames in Figure 1 are only partially included (Figure 1).

The numbers in parentheses indicate how many specific surfaces described in the scientific literature

belong to a given surface group. The numbers in square brackets identify the reference number in the “Reference list” section, in which the corresponding surfaces are examined most thoroughly.

3. Summary of studies on kinematic surfaces

According to Figure 1, the “Kinematic surfaces of general type” class has instances of 14 surface classes that have the same property – the surfaces are formed by the motion of congruent curves in space. For example, if we consider that *rotational surfaces* are formed by the rotation of a meridian around the surface axis, then these surfaces can be attributed to the considered class of surfaces.

It is generally accepted that kinematic surfaces are sub-divided into translation, rotational and spiroidal surfaces. However, the following classification demonstrates that some more surfaces of 11 classes can be included in this classification.

Translation surfaces refer to surfaces formed by a parallel (progressive) translation of a curve of one direction so that a certain point of the curve slides on another curve. The directrix and generatrix curves of the *direct translation* surface lie in mutually perpendicular planes. One translation surface, the *Scherck surface* (the first) is even in the “Minimal surfaces” class. *Diagonal translation surfaces* are formed by a parallel translation of a plane curve so that its two symmetric points continuously touch the plane outline. In some works, velaroidal surfaces are considered as translation surfaces. A *velaroidal* surface refers to a translation surface with a generatrix curve that changes its curvature in motion that results in a surface on a plane rectangular plane. Hence velaroidal surfaces cannot be considered a class of kinematic surfaces formed by congruent sections. An extended classification of the translation surfaces is given in the paper [13].

A *rotational surface* is formed by an arbitrary curve in the case of rolling without slipping of the moving torse, with which the generating curve is rigidly connected, over the stationary torse [15]. Thus, the whole class of rotational surfaces can be included in the class of kinematic surfaces of general type. Plane, cylinder, cone and straight line are private torse forms. The torse can only roll without slipping along its curvature. Figure 1 contains ten possible combinations of stationary and mobile axoids. A cone and a cylinder, a cylinder and a torse cannot form pairs of axoids for rotational motion. A *skew helicoid* can also be viewed as a rotational surface.

In this case, the mobile axoid must be assumed to be the plane that will roll along the stationary circular cylinder. The generatrix straight line must be parallel to the movable plane, cross the axis of the straight circular cylinder at a given acute angle and be rigidly connected to the movable plane. A ruled rotational surface is formed by rolling a cylinder of $R/2$ radius on a cylinder of R radius with the generatrix straight line lying in the meridional plane of the movable cylinder [16].

A *spiroidal surface* can be defined by two stationary and mobile axoids adjacent to each other along a common generatrix (Figure 1), and a generatrix line rigidly connected to the mobile axoid in its initial position. The mobile axoid is due to the helical motion [15; 17]. A spiroidal surface with “cone-plane” axoids and a generating straight line lying in a movable plane is called a *ruled conical screw shell*. If, however, a circle is considered to be the generatrix curve, then it is called a *cyclic conical screw shell*. An *ordinary screw surface* can be called a degenerate cylindrical screw shell if we assume that the stationary axoid-cylinder has degenerated into its axis – a straight line. The *Rachkovskaya – Harabayev spiroidal ruled surfaces* are formed by the generatrix a selected straight generatrix of a given arbitrary cone, taken as a mobile axoid, which rolls with slipping along another torse surface, i.e. a stationary axoid. The apex of the cone is always on the edge of regression and the two ruled surfaces are in contact with each other at every moment along their common straight generatrix [9].

A large number of kinematic surfaces can be identified in the “*Cyclic surfaces*” class. For example, the group of tubular surfaces with a generating circle of constant radius contains interesting surfaces such as a circular torus, a tubular spiral, a tubular screw surface, a tubular surface on the sphere (Figure 2), a tubular loxodroma, etc. All these surfaces are described in the encyclopaedia [1]. Tubular surfaces refer to the “*Normal cyclic surfaces*” subclass [7]. There are also kinematic surfaces in the subclasses of “*Cyclic surfaces with parallelism plane*” and “*Cyclic surfaces with circles in beam planes*”. The most familiar cyclic surfaces with circles of constant radius in the beam planes are the *St. Elijah surface*, *the clover knot*, *the circular screw* and *the circular spiral surfaces*. In principle, all cyclic surfaces with a generating circle of constant radius can also be included in the class of congruent section surfaces.

Recently a series of articles concerning study and visualization of congruent section surfaces on pendulum-type cylinders has appeared [8; 18]. Figure 3 shows a surface which can be simultaneously attributed to cyclic surfaces with parallelism plane or to congruent section surfaces of pendulum type on cylinders.



Figure 2. The tubular surface on the sphere

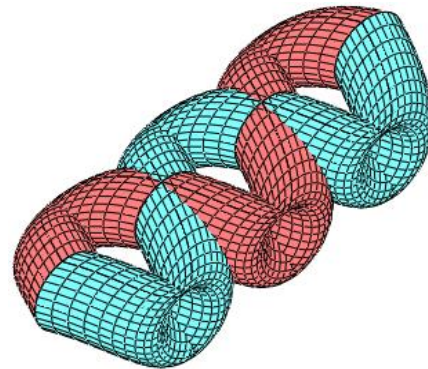


Figure 3. The computer model of the two joined cyclic surfaces of congruent circular sections of pendulum type

There is no consensus among geometers on which surfaces should be included in the “*Spiral surfaces*” class. In [19], this class comprises spherical, conical and cylindrical spiral surfaces. However, the [1] divides these surfaces into 4 classes: “*Spiral surfaces*”, “*Screwed surfaces*”, “*Screw-shaped surfaces*” and “*Spiral-shaped surfaces*”.

In this study, the classification is based on the following definitions of the 4 classes listed below, whose instances can be included in the kinematic surfaces of general type.

A *screw surface* is formed by a congruent curve in screw motion, i.e. the generating curve rotates evenly around the axis of rotation and simultaneously makes a translation motion in the direction of the same axis. If the ratio of straight-line velocity to angular velocity is constant, the screw motion is

called *ordinary*, and the surface is called an *ordinary screw surface* (Figure 4). A *sinusoidal helicoid* is a *twisted surface with congruent sinusoids in parallel planes*. The surface under consideration is formed by rotating a sinusoid located in a plane perpendicular to the axis of rotation. The sinusoidal helicoid is presented only in [1]. The *Dini helicoid*, which is formed by the ordinary screw motion of a tractrix, is very well-known. *Pseudosphere* is a particular case of the Dini helicoid. If in screw motion the ratio of translation velocity to angular velocity is variable, then the trajectories of points of the generating curve will be cylindrical screw lines with variable pitch, and the screw surface will be termed a screw surface with variable pitch.

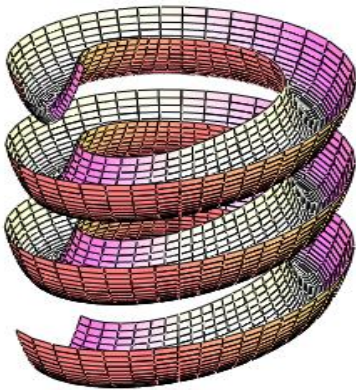


Figure 4. A variety of a screw surface of the congruent parabolic sections with the axes parallel to the axis of the guiding cylinder

The generatrix rigid curve forming a *spiral surface* makes a screw motion and simultaneously undergoes a similar transformation with a similarity coefficient, proportional to the rotation angle and with a constant similarity centre located on the rotation axis (Figure 5). The trajectories of curve points in the specified motion will be located on circular cones.

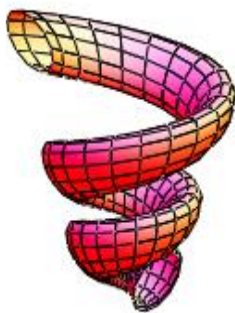


Figure 5. The spiral surface with a generatrix ellipse

Any spiral on any surface can be considered as the directrix curve of a *spiral surface*. However, the generatrix curve cannot change its shape as it moves along the directrix curve. Any spiral on any surface can be considered as the directrix curve of a spiral surface, but the forming curve cannot change its shape as it moves along the guiding curve. A large set of spirals on rotational surfaces is given in [20]. A tubular surface on the sphere (Figure 2) can also be called a spiral surface.

Screw-shaped surfaces refer to surfaces constructed by generatrix rigid curves which, in addition to a simple screw motion about the screw axis, make some additional motion (Figure 6). Screw-shaped surfaces can degenerate into screw surfaces under certain selection of geometric parameters. Screw-shaped surfaces with congruent generatrix curves are uncommon in the scientific literature.

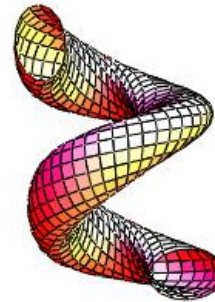


Figure 6. The screw-shaped twisted surface of the elliptical cross section in the beam planes

Carved surfaces are the surfaces in which the planes of one family of curvature plane lines are orthogonal to the surface.

A *carved surface of general type* may be considered a surface formed by a plane generatrix curve with one point moving along an arbitrary directrix curve. The curve must be in the normal plane of the directrix curve all the time. In this case, all coordinate lines of one family are congruent curves and the other family of coordinate lines is orthogonal to them. A *carved sinusoidal surface* is formed by a plane sine generatrix as one of its points moves along a plane sine directrix in the normal plane of the sine directrix (Figure 7). The carved sinusoidal surface can also be attributed to the class of undulating surfaces. Six more carved surfaces of general type are described in the encyclopaedia [1].

A *Monge carved surface* can be constructed by the kinematic method of rolling without slipping a plane with a plane line (meridian) along a deve-

lopable surface. The simplest example of a Monge surface is a *rotational surface*. The method of constructing carved surfaces makes it possible to divide them into three groups depending on the type of directrix surface (*stationary axoid*): carved surfaces with cylindrical, conical and torse directrix surfaces. A *ruled conical shell of rotation* is a Monge carved surface with a conical directrix surface and a generatrix straight curve lying in a plane that rolls without slipping along a circular cone.

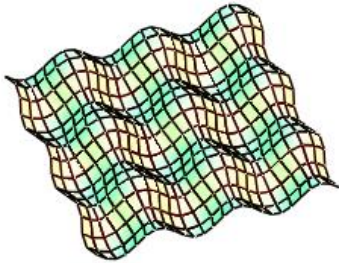


Figure 7. The carved sinusoidal surface

An example of a congruent section surface is a *twisted surface with congruent ellipses in parallel planes*, which is formed by rotation of ellipse $X = X(v) = b \cos v$; $Y = Y(v) = c \sin v$, located in the plane perpendicular to the rotation axis. The origin of the movable coordinate system oXY is located on the stationary coordinate axis Ox (Figure 8).

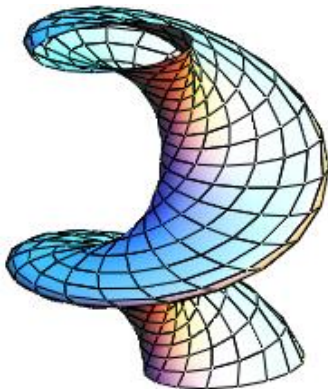


Figure 8. The twisted surface with congruent ellipses in parallel planes

Sometimes it is difficult to classify some surfaces into a familiar surface class, so it was necessary to organise the “Undulating, waving and corrugated surfaces” class.

Undulating surfaces are formed by the reciprocating and oscillating motion of rigid generatrix curves fluctuating relative to pre-selected basic sur-

faces, planes or lines. According to the definition of these surfaces, they can also include many familiar kinematic surfaces of a general type, as shown in Figure 1.

Waving surfaces are formed by the reciprocating and oscillating motion of generatrix curves which not only fluctuate relative to selected basic surfaces, planes or lines, but also deform themselves (Figure 9). Consequently, this group of surfaces cannot be included in the “Congruent section surfaces” class.

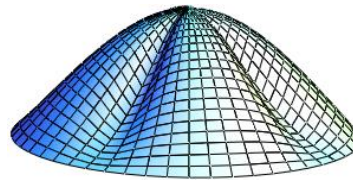


Figure 9. The waving surface with the pseudo Agnesi curls on a circular plan

Corrugated products are made by bending sheet metal and non-metal materials to give their surfaces a wave-shaped form with different sections in order to increase their strength.

4. Applications of kinematic surfaces

The monograph [21] addresses some issues of dynamic shaping in architecture. Some ideas from this research can be used for the surfaces under consideration.

Vyacheslav N. Ivanov [22] suggests several sketches of single and multi-wave vaulted coverings in the form of tubular shell fragments. Three real structures in the form of congruent section surfaces are indicated in [8]. In [23], among hundreds of structures illustrations, one can find a dozen of public buildings in the form of congruent section surfaces. Alexey V. Efremenko in his PhD thesis [24] reveals that the choice of the optimal coverage of a construction site can be made by selecting paired combinations of axoids and varying their parameters and parameters of generatrix curves, which allows obtaining multivariant solutions for the model based on rotational space transformations. The method developed by the author was used in the design of coverings for a water sports complex in Rostov-on-Don and a shopping mall in Kamensk.

Screw surface of parabolic congruent sections with axis parallel to vertical Oz axis in beam planes passing through Oz axis is used as chute for descend-

ing of bulk or liquid cargo (Figure 3). There is a description of a spiral screw conveyor surface [25].

In [26] it is proposed to use spiral minimum surfaces in astrophysics for simulation of spiral objects or in fluid dynamics. The technical literature gives examples of the use of spiral surfaces on circular cones in waste-heat boilers [27], vibrating conveyors, loading devices of a barrel, extraction apparatus, etc.

Vladimir V. Torshin [28] describes many natural objects and phenomena by means of spiral (spiral-shaped) surfaces. In addition, the researcher found an application of spiral surfaces to represent phenomena in electrodynamics.

Corrugated surfaces are the most widely used in mechanical engineering.

The possibility of practical application of engineering and computer graphics methods and computational geometry to visualise frames, required for machining of parts on metal-cutting equipment, is studied in [29]. Here, methods of system mathematical modelling of congruent section surfaces are considered.

Many examples of screw-shaped building and mechanical engineering constructions are given in the overview [30]. These include screw-shaped fragments of constructions and buildings, screw supports and anchors. Screw-shaped surfaces can be seen in constructions of building machines and mechanisms, screw lifts, in gear shapes and gear transmission grooves, and in heat-exchange units [31]. Screw and screw-shaped surfaces are common in blade shapes in the marine, aircraft and other mechanical engineering industries. Some examples of the cyclic surfaces, indicated in Figure 1, used in practice are given in [32].

There are hundreds of actually constructed facilities in the form of rotation and translation surfaces. They have been described in thousands of publications.

In view of the extensive use of kinematic surfaces in practice, mechanical engineers provide analytical [33] and numerical [34] methods for the calculating the strength of products and constructions in the form of various types of kinematic surfaces [35] under static and dynamic loads [31]. Geometricians also continued geometric researches [36].

5. Results

The surfaces of 38 classes were analysed. Thus, it was found that kinematic surfaces of general type with congruent generatrix curves exist in 14 classes.

A classification of kinematic surfaces was compiled. It is necessary to note that the first attempt to set up a classification of kinematic surfaces was undertaken by Zolotuhin [37]. The methods of kinematic surface formation were used while making the classification. The classification will simplify the presentation of methods of construction of these surfaces by means of computer graphics. In [38] examples of surface construction with the system of plane coordinate lines using MathCad and AUTOCad software packages are considered. In particular, drawings of normal surfaces with constant generatrix curve, Monge carved surfaces, translation surfaces, cyclic surfaces, screw surfaces with generatrix curves in beam planes and other kinematic surfaces are shown in Figure 1.

The material in the “Applications of kinematic surfaces” section provides an insight into how geometric studies influence the development of certain branches of mechanical engineering, construction and the modeling of natural phenomena.

Conclusion

In this study, a classification of kinematic surfaces with a rigid mobile generatrix curve is first proposed. The inclusion of individual surface groups into the classification is explained. The references mentioned are focused only on the geometrical problems of the considered surfaces, their application in practice and visualization of the surfaces by means of computer graphics.

References

1. Krivoshapko SN, Ivanov VN. *Encyclopedia of analytical surfaces*. Springer; 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11773-7>
2. Krivoshapko SN, Ivanov VN. Surfaces of congruent sections on cylinder. *Vestnik MGSU*. 2020;15(12): 1620–1631. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.12.1620-1631>
3. Kheyfets AL, Galimov D, Shleykov I. Kinematic and analytical surfaces programming for solution of architectural designing tasks. *GraphiCon' 2001, September*. Nizhny Novgorod; 2001. p. 283–286.
4. Bi M, He Y, Li Z, Lee T-U, Min Xie Y. Design and construction of kinetic structures based on elastic strips. *Automation in Construction*. 2023;146:104659. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104659>
5. Krivoshapko SN. On parabolic bending of plane metal sheet into torse structure. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2020;11(221):14–24. (In Russ.)

6. Krivoshapko SN. Cyclic surfaces with the circles in the planes of pencil and with the straight directrices. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2004;(13):8–13. (In Russ.)
7. Ivanov VN, Shmelyova AA. Geometry and forming of thin-walled space structures on the basis of normal cyclic surfaces. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016;(6):3–8. (In Russ.)
8. Alborova LA, Strashnov SV. Surfaces of congruent sections of pendulum type on cylinders with generatrix superellipses. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(1):64–72. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-64-72>
9. Rachkovskaya GS, Kharabaev YuN, Rachkovskaya NS. The computer modelling of kinematic linear surfaces (based on the complex moving a cone along a torse). *Proceedings of the International Conference on Computing, Communication and Control Technologies (CCCT 2004)*. Austin, Texas; 2004. p. 107–111.
10. Romanova VA. Forming of Monge's surfaces by kinematical method with the help of AUTOCAD. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(2):106–116. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-2-106-116>
11. Virich SO. Design of spiral surfaces with the help of congruences of helical lines. *Geometrichne i Kompyutrne Modelyuvannya*. 2005;(9):28–31.
12. Krivoshapko SN. Analytical ruled surfaces and their complete classification. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(2):131–138. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-131-138>
13. Strashnov SV, Rynkovskaya MI. On question of classification of analytical surfaces. *Geometry and Graphics*. 2022;10(1):36–43. <https://doi.org/10.12737/2308-4898-2022-10-1-36-43>
14. Alaeva TYu. On question of classification of surfaces. *Actual Problems of Science in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the 71st International Scientific-Practical Conference* (vol. 2). Karavaevo; 2020. p. 6–11. (In Russ.)
15. Krivoshapko SN, Shambina SL. Researches and visualization of rotative and spiroidal surfaces. *Applied Geometry and Engineering Graphics. Proceedings of TDATU*. 2011;49(4):33–41.
16. Lusta GI. A review on rotational surfaces. *Trudy Moskovskogo Nauchno-Metodicheskogo Seminara po Nachertatelnoy Geometrii i Inzhenernoy Grafike*. 1963;(2):120–124. (In Russ.)
17. Yadgarov DYa, Sholomov IH. Analytical method of design of spiroidal surfaces with axoids “torse – torse”. *Prikladnaya Geometriya ta Inzhenernaya Grafika*. 1983;(35):102–105. (In Russ.)
18. Krivoshapko SN, Shambina SL. The pendulum type surfaces with congruential cross sections. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(2):165–174. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-165-174>
19. Lebedev VA, Solovjov VP, Webb BW. View factors of spherical, conic, and cylindrical spiral surfaces. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2021; 274(1):107866. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107866>
20. Lazureanu C. Spirals on surfaces of revolution. *VisMath*. 2014;16(2):1–10.
21. Saprykina NA. *The bases of dynamic forming in architecture*. Moscow: Architecture-C Publ.; 2005. (In Russ.)
22. Ivanov VN. Geometry and design of tubular shells. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2005; (1):109–114. (In Russ.)
23. Krasic S. *Geometrijske površi u arhitekturi*. Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu; 2012.
24. Efremenko AV. *Research of ruled and non-ruled surfaces on the basis of new types of transformation of space* (Thesis of PhD diss.). Nizhniy Novgorod; 2000. (In Russ.)
25. Isaev YuM, Grishin OP, Nastin AA, Semashkin NM, Shurekov AV. Rolling of grains from spiral-and-helical surface of the conveyer. *Modern High Technologies*. 2008;(7):86–87.
26. Kiselev AV, Varlamov VI. *On spiral minimal surfaces*. Cornell University; 2006. p. 1–18.
27. Tzetzzerin YuA, Serogodskiy VN. *Repair of rec-lamation kettle in chemical industry*. Moscow: Khimiya Publ.; 1984.
28. Torshin VV. *Spiral formation in nature and electro-dynamics*. Moscow: TzP VASIZDAST Publ.; 2008.
29. Nartya VI. *Unitized-and-matrix method of mathematical modelling of surfaces*. Vologda: Infa-Ingeneriya Publ.; 2016. (In Russ.)
30. Krivoshapko SN. *Analysis and design of helix-shaped structures used in building and building machines* (review information) (issue 1). Moscow: VNIINTPI Publ.; 2006. (In Russ.)
31. Whiston GS. Use of screw translational symmetry for the vibration analysis of structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1982;18(3):435–444.
32. Bock Hyeng C.A., Yamb E.B. Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics. *International Journal of Modern Engineering Researches*. 2012;2(3):799–806.
33. Juhanio Marulanda Ar. *Analysis of shells in the form of carved surfaces of Monge*. Ph diss. Moscow: UDN Publ.; 1970. (In Russ.)
34. Yakupov NM. Analysis of carved surfaces. *Actual Problems of Mechanics of Shells*. Kazan: KISI Publ.; 1988. (In Russ.)
35. Skidan IA. *Kinematical modelling of kinematical surfaces in special coordinates*. DS diss. Moscow: MADI Publ.; 1989. (In Russ.)

36. Efimov M.I. Calculation of volume of compartments limited by some rotative surfaces. *Nachertatel'naya Geometriya i eyo Prilozheniya*. 1979;(3):103–105 (In Russ.)
37. Zolotuhin V.F. Classification of surfaces. *Collection of Scientific and Methodological Articles on Descriptive Geometry and Engineering Graphics* (issue 10). Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1983. p. 3–12. (In Russ.)
38. Ivanov V.N., Romanova V.A. *Constructive forms of spatial structures (visualization of surfaces in MathCad, AutoCad)*. Moscow: ASV Publ.; 2016. (In Russ.)

Список литературы

1. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Энциклопедия аналитических поверхностей. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 560 с.
2. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Поверхности конгруэнтных сечений на цилиндрах // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1620–1631. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.12.1620-1631>
3. Kheyfets A.L., Galimov D., Shleykov I. Kinematic and analytical surfaces programming for solution of architectural designing tasks // GraphiCon' 2001, September. Nizhny Novgorod, 2001. Pp. 283–286.
4. Bi M., He Y., Li Z., Lee T-U., Min Xie Y. Design and construction of kinetic structures based on elastic strips // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 146. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104659>
5. Кривошапко С.Н. О параболическом изгибании плоского металлического листа в торсовую конструкцию // *Технология машиностроения*. 2020. № 11 (221). С. 14–24.
6. Кривошапко С.Н. Циклические поверхности с окружностями в плоскостях пучка и с прямыми направляющими // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2004. № 13. С. 8–13.
7. Иванов В.Н., Шмелева А.А. Геометрия и формообразование тонкостенных пространственных конструкций на основе нормальных циклических поверхностей // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2016. № 6. С. 3–8.
8. Alborova L.A., Strashnov S.V. Surfaces of congruent sections of pendulum type on cylinders with generatrix superellipses // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Т. 18. № 1. С. 64–72. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-64-72>
9. Rachkovskaya G.S., Kharabaev Yu.N., Rachkovskaya N.S. The computer modelling of kinematic linear surfaces (based on the complex moving a cone along a torse) // *Proceedings of the International Conference on Computing, Communication and Control Technologies (CCCT 2004)*. Austin, Texas, 2004. Pp. 107–111.
10. Романова В.А. Образование поверхностей Монжа кинематическим способом в среде AUTOCAD // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 2. С. 106–116. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-2-106-116>
11. Вірвич С.О. Вилучення спіральної поверхні з конгруенції кінчних гвинтових ліній// *Геометричне та комп'ютерне моделювання*. Харків: ХДУХТ, 2005. Вип. 9. С. 28–31.
12. Кривошапко С.Н. Аналитические линейчатые поверхности и их полная классификация // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2020. Т. 16. № 2. С. 131–138. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-131-138>
13. Страинов С.В., Рынковская М.И. К вопросу о классификации аналитических поверхностей// *Геометрия и графика*. 2022. Т. 10. № 1. С. 36–43. <https://doi.org/10.12737/2308-4898-2022-10-1-36-43>
14. Алаева Т.Ю. К вопросу о классификации поверхностей // *Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сборник статей 71-й международной научно-практической конференции: в 3 томах. Том 2 / под ред. С.В. Цыбакина, М.А. Ивановой, А.В. Рожнова. Караваево, 2020. С. 6–11.*
15. Кривошапко С.Н., Шамбина С.Л. Исследование и визуализация ротативных и спироидальных поверхностей // *Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці Таврійський державний агротехнологічний університет*. Вип. 4. Т. 49. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. С. 33–41.
16. Луста Г.И. Обзор ротативных поверхностей // *Труды Московского научно-методического семинара по начертательной геометрии и инженерной графике*. М., 1963. Вып. 2. С. 120–124.
17. Ядгаров Д.Я., Шоломов И.Х. Аналитический способ конструирования спироидальных поверхностей с аксоидами торс – торс // *Прикладная геометрия и инженерная графика*. Киев, 1983. Вып. 35. С. 102–105.
18. Krivoshapko S.N., Shambina S.L. The pendulum type surfaces with congruential cross sections// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2021. Т. 17. № 2. С. 165–174. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-2-165-174>
19. Lebedev V.A., Solovjov V.P., Webb B.W. View factors of spherical, conic, and cylindrical spiral surfaces // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2021. Vol. 274. Issue 1. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107866>
20. Lazureanu C. Spirals on surfaces of revolution // *VisMath*. 2014. Vol. 16. No. 2. Pp. 1–10.
21. Сапрыкина Н.А. Основы динамического формообразования в архитектуре. М.: Архитектура-С, 2005. 312 с.
22. Иванов В.Н. Геометрия и конструирование трубчатых оболочек // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2005. № 1. С. 109–114.

23. *Krasic S.* Geometrijske površi u arhitekturi. Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu, 2012. 238 p.
24. *Ефременко А.В.* Исследование линейчатых и нелинейчатых поверхностей на основе новых видов преобразования пространства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород, 2000. 26 с.
25. *Исаев Ю.М., Гришин О.П., Настин А.А., Семашкин Н.М., Шуреков А.В.* Скатывание зерна со спирально-винтовой поверхности транспортера // *Современные наукоемкие технологии*. 2008. № 7. С. 86–87.
26. *Kiselev A.V., Varlatov V.I.* On spiral minimal surfaces. Cornell University, 2006. Pp. 1–18.
27. *Церерин Ю.А., Серогодский В.Н.* Ремонт котлов-утилизаторов в химической промышленности. М.: Химия, 1984. 88 с.
28. *Торшин В.В.* Спиральные образования в природе и электродинамике. М.: ЦП ВАСИЗДАСТ, 2008. 251 с.
29. *Нартя В.И.* Блочно-матричный метод математического моделирования поверхностей. Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. 236 с.
30. *Кривошапко С.Н.* Расчет и проектирование винтообразных конструкций, применяемых в строительстве и строительных машинах (обзорная информация). М.: ВНИИТПИ, 2006. Вып. 1. 60 с.
31. *Whiston G.S.* Use of screw translational symmetry for the vibration analysis of structures // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1982. Vol. 18. No 3. Pp. 435–444.
32. *Bock Hyeng C.A., Yamb E.B.* Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics // *International Journal of Modern Engineering Researches*. 2012. Vol. 2. Issue 3. Pp. 799–806.
33. *Юханио Маруланда Ар.* Расчет оболочек в форме резных поверхностей Монжа: дис. ... канд. техн. наук. М.: УДН, 1970. 154 с.
34. *Якупов Н.М.* Расчет оболочек типа резных // *Актуальные проблемы механики оболочек: тезисы докладов*. Казань: КИСИ, 1988. С. 242
35. *Скидан И.А.* Кинематическое моделирование кинематических поверхностей в специальных координатах: дис. ... д-р техн. наук. М.: МАДИ, 1989.
36. *Ефимов М.И.* Об определении объемов отсеков, ограниченных некоторыми ротативными поверхностями // *Начертательная геометрия и ее приложения*. 1979. № 3. С. 103–105.
37. *Золотухин В.Ф.* Классификация поверхностей // *Сборник научно-методических статей по начертательной геометрии и инженерной графике*. М.: Высшая школа, 1983. Вып. 10. С. 3–12
38. *Иванов В.Н., Романова В.А.* Конструкционные формы пространственных конструкций. Визуализация поверхностей в системах MathCad, AutoCad. М.: Изд-во АСВ, 2016. 412 с.

About the author

Sergey N. Krivoshapko, DSc, Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9385-3699, Scopus Author ID: 6507572305, eLIBRARY SPIN-code: 2021-6966; sn_krivoshapko@mail.ru

Сведения об авторе

Кривошапко Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор департамента строительства, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-9385-3699, Scopus Author ID: 6507572305, eLIBRARY SPIN-код: 2021-6966; sn_krivoshapko@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186

EDN: BTWBKJ

УДК 629.331

Научная статья / Research article

Математическая модель рекуперации электрической энергии транспортного средства

З.Н. Лин , А.В. Скрынников , К.В. Чижевский , В.Н. Сидоров

Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана,
Калуга, Российская Федерация
✉ sidorov-kaluga@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 ноября 2022 г.

Доработана: 21 января 2023 г.

Принята к публикации: 25 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

узел рекуперации, расход топлива,
Matlab Simulink, гибридные автомобили

Аннотация. В настоящее время наиболее энергоэффективными являются электрические и гибридные автомобили, которые, несмотря на высокую стоимость и недостаточное конструктивное совершенство, вытесняют традиционные автомобили с двигателями внутреннего сгорания. В гибридные автомобили относительно легко внедрить системы сбора энергии с использованием реверсивных электрических машин и электрических аккумуляторов. Исследована генерация электрической энергии на автомобиле. Использовались методы математического и имитационного моделирования. Получены результаты, показывающие эффективность эксплуатации транспортного средства с узлом рекуперации электрической энергии. Приводятся данные сгенерированного электрического тока в виде получаемого напряжения при движении транспортного средства по различным видам дорожных покрытий. Посредством имитационного моделирования установлено, что один рекуператор может вырабатывать в среднем около 3 В, а со всех устанавливаемых четырех рекуператоров можно получить 12 В, что достаточно для зарядки накопителей гибридной силовой установки.

Для цитирования

Лин З.Н., Скрынников А.В., Чижевский К.В., Сидоров В.Н. Математическая модель рекуперации электрической энергии транспортного средства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 177–186. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186>

Mathematical model of vehicle electrical energy recovery

Zar Ni Lin , Alexei V. Skrynnikov , Konstantin V. Chizhevsky , Vladimir N. Sidorov

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, Russian Federation
✉ sidorov-kaluga@yandex.ru

Article history

Received: November 12, 2022

Revised: January 21, 2023

Accepted: February 25, 2023

Abstract. Nowadays, the most energy efficient are electric and hybrid vehicles. Despite the very high cost and insufficient design perfection, they are replacing traditional cars with internal combustion engines. In hybrid vehicles, it is relatively easy to implement energy storage systems using reversible electric



Keywords:

recovery unit, fuel consumption, Matlab Simulink, hybrid vehicles

machines and electric batteries. The results of a study on electrical energy generation in a vehicle are presented. The methods of mathematical and simulation modelling were used. The efficiency of operation of a vehicle with an electrical energy recovery unit is shown. The data of the generated electric current in the form of the received voltage when the vehicle is moving on various types of road surfaces are given. As a result of simulation modelling, it was found that one recuperator can generate an average of about 3 V, 12 V can be obtained from all four installed recuperators, which is enough to charge the storage units of the hybrid power plant.

For citation

Lin ZN, Skrynnikov AV, Chizhevsky KV, Sidorov VN. Mathematical model of vehicle electrical energy recovery. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):177–186. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186>

Введение

Мировая тенденция роста цен на топливо и жесткая рыночная конкуренция вынуждают разработчиков и производителей проводить интенсивные исследования и ускорять внедрение энергоэффективных силовых установок и систем при создании новых транспортных средств различного назначения [1–2]. В настоящее время наиболее энергоэффективными являются электрические и гибридные автомобили, которые, несмотря на весьма высокую стоимость и еще недостаточное конструктивное совершенство, вытесняют традиционные автомобили [2–3].

Дальнейшее увеличение производства электромобилей и гибридных транспортных средств по-прежнему ограничивается дефицитом эффективных, компактных, безопасных и энергоемких аккумуляторов (ионно-литиевые, нанофосфаты лития, никель-металлогидритные и др.) [4–5]. В гибридных автомобилях относительно легко внедрить системы сбора энергии с использованием реверсивных электрических машин и электрических аккумуляторов [6]. При этом основным направлением рекуперации энергии, уже реализованным, являются различные практически проверенные системы выработки, накопления и реализации электрической энергии, получаемой при торможении машины [7–8].

В [9] рассмотрено устройство системы поддрессоривания транспортного средства с рекуперацией механической энергии колебаний транспортного средства в электрическую энергию. Представлена математическая модель системы поддрессоривания транспортного средства на основе амортизатора с рекуперативным эффектом. С помощью математической модели определена мощность, которую способна рекуперировать система поддрессоривания транспортным сред-

ством при движении по дорогам неоднородного качества (асфальтовой и грунтовой) с различной скоростью. Зафиксировано, что при движении транспортного средства со скоростью 40–50 км/ч по асфальтобетонной дороге средняя рекуперированная мощность системы составляет 0,011 кВт, а при движении по грунтовым дорогам – 0,206 кВт.

В свою очередь в [10] описывается подход к энергоэффективному использованию активной электромеханической подвески. В работе основной целью является минимизация потерь энергии в активной подвеске посредством использования рекуперативного демпфирования колебаний движителей.

Проведенный анализ алгоритмов управления параметрами подвески показал, что они имеют сложную структуру и для их реализации необходимы сложные системы управления.

В [11] приведены различные виды устройств рекуперации подвески автомобиля, определены наиболее перспективные из них. Создан образец электрического амортизатора-рекуператора с высокими эксплуатационными свойствами, который относится к типу линейных электромагнитных генераторов.

Построены циклограммы по времени действительных значений индуцируемого переменного тока, получены значения производимой устройством работы. Производимая устройством энергия варьируется в пределах от 0,3 до 1,9 кВт·ч.

Результаты многочисленных исследований указывают на перспективы повышения экономичности транспортных средств за счет создания в их подвесках эффективных систем рекуперации. Неизбежные колебания поддрессоренной массы движущегося автомобиля, естественно, потребляют часть мощности силовой установки, на ко-

торую по разным оценкам, в зависимости от дорожных условий, приходится не менее 10–20 % потерь. Эта энергия может быть использована без ущерба для снижения эффективности работы подвески.

Цель исследования – изучение генерации электрической энергии и изменения плавности хода транспортного средства с узлом рекуперации электрической энергии с помощью модели в среде MATLAB Simulink.

1. Материалы и методы

Основными элементами электромагнитного рекуператора являются корпус, шток и крышка корпуса. В основе разрабатываемой конструкции линейного рекуператора лежит электромагнитная система. Данная система состоит из постоянного магнита, 125 листов электротехнической стали и 9 катушек. Крепиться рекуператор будет болтовыми соединениями в двух местах – в верхней части корпуса к раме автобуса и штоком к балке подвески.

Компоновочная схема разрабатываемого электромагнитного рекуператора представлена на рис. 1.

Магнит (9), приклеенный ко штоку (7), совершает вместе с ним возвратно-поступательные движения при колебании колеса автобуса, при этом магнитное поле магнита пересекает магнитные поля катушек (3), намотанных на листы электротехнической стали (1), вследствие чего в системе наводится электродвижущая сила (ЭДС) индукции. К корпусу крепится крышка (5) с помощью четырех болтовых соединений, состоящих из гайки (12), шайбы (13) и болта (14). В крышку устанавливается втулка из антифрикционного материала, позволяющая штоку совершать поступательные движения. Манжета (6) не позволяет попасть пыли и другим инородным телам внутрь устройства. Верхний (4) и нижний (10) изоляторы экранируют электромагнитный узел от металлического корпуса, тем самым уменьшая потери. С помощью втулок (8) рекуператор крепится к раме автомобиля и балке подвески.

Рекуперативное устройство устанавливается так же, как амортизатор, и имеет ту же величину хода штока. В верхней части крепление производится к раме транспортного средства с помощью болтовых соединений, в нижней – к балке подвески также с помощью болтовых соединений.

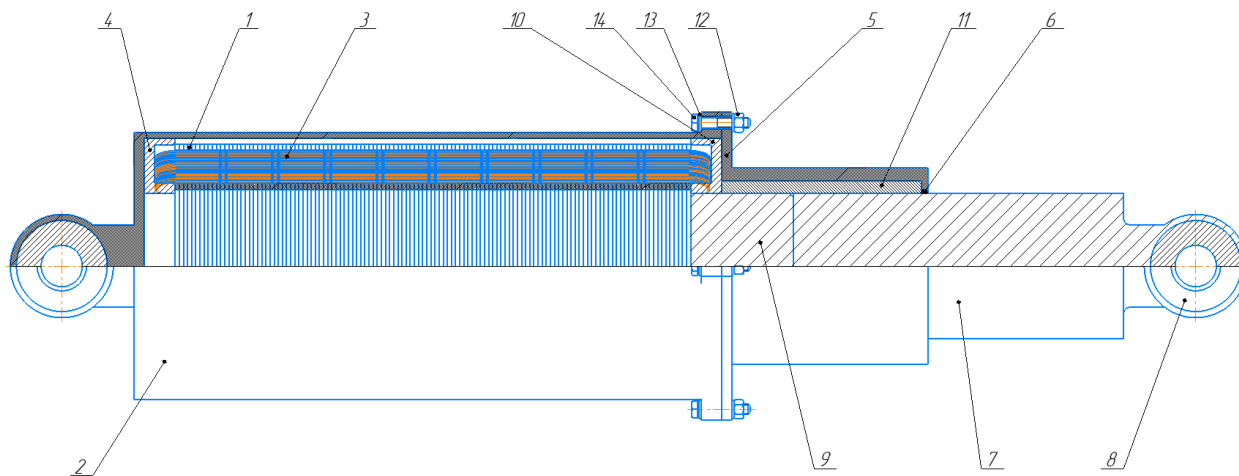


Рис. 1. Компоновочная схема линейного электромагнитного рекуператора:

1 – электротехническая сталь; 2 – корпус; 3 – катушка; 4 – верхний изолятор; 5 – крышка корпуса; 6 – манжета; 7 – шток; 8 – втулка крепления; 9 – магнит; 10 – нижний изолятор; 11 – втулка из антифрикционного материала; 12 – гайка; 13 – шайба; 14 – болт

Figure 1. Layout scheme of a linear electromagnetic recuperator:
1 – electrical steel; 2 – housing; 3 – coil; 4 – upper insulator; 5 – housing cover; 6 – cuff; 7 – rod; 8 – fastening sleeve; 9 – magnet; 10 – lower insulator; 11 – sleeve made of anti-friction material; 12 – nut; 13 – washer; 14 – bolt

Пример компоновочной схемы подвески транспортного средства с узлом рекуперации электрической энергии представлен на рис. 2.

Эффективность данного устройства заключается в следующем: уменьшаются затраты на генерацию электрической энергии для зарядки

аккумуляторных батарей, увеличивается плавность хода транспортного средства.

Для исследования рекуперации электрического тока необходимо определить скорость движения штока рекуператора, который в общем устройстве подвески является демпфирующим элемен-

том. Скорость движения штока можно определить по их математической модели, составленной по схеме, представленной на рис. 3.

Чтобы моделировать движение колеса в вертикальной плоскости, необходимо располагать информацией о силовых факторах, действующих на него в каждый момент времени. В общем случае на i -е колесо j -го борта действуют [12–13]:

- сила в i -м упругом элементе j -го борта $P_{yij}(h_{ij})$, Н;
- сила в i -м демпфирующем элементе j -го борта $P_{dij}(\dot{h}_{ij})$, Н;
- вес колеса $m_{ij}g$, кг и сила инерции $m_{ij} \frac{d^2 z_{ij}}{dt^2}$ Н;
- упругая $P_{y.kij}$, Н и демпфирующая $P_{d.kij}$, Н составляющие со стороны шины.

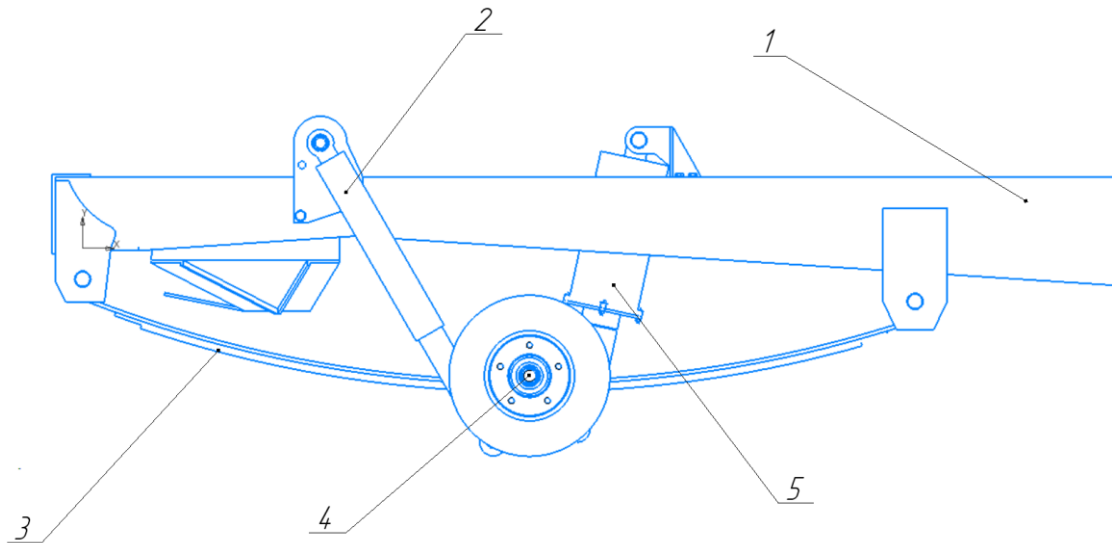


Рис. 2. Компонентная схема подвески транспортного средства со встроенным рекуператором:
1 – рама; 2 – амортизатор; 3 – комплект рессор; 4 – балка с установленным на ней поворотным кулаком; 5 – рекуперативное устройство
Figure 2. Layout scheme of a vehicle suspension with a built-in recuperator:
1 – frame; 2 – shock absorber; 3 – set of springs; 4 – beam with a mounted steering knuckle on it; 5 – recuperative device

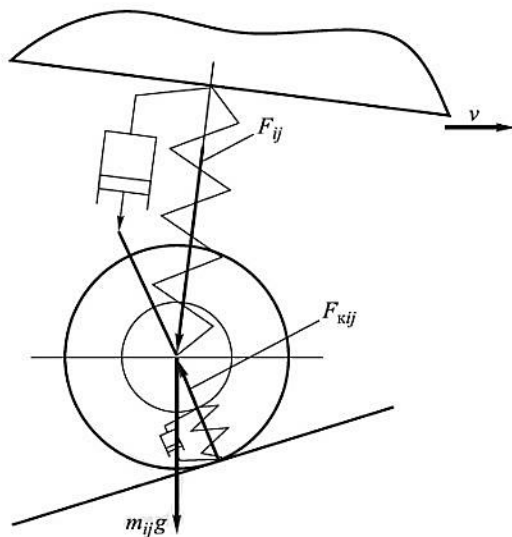


Рис. 3. Схема взаимодействия колеса с опорным основанием:
 v – скорость движения КМ; F_{ij} – сила в i -й подвеске j -го борта;
 F_{kij} – сила в i -м колесе j -го борта; $m_{ij}g$ – вес колеса
Figure 3. Scheme of wheel interaction with supporting base:
 v – speed of the vehicle; F_{ij} – force in the i -th suspension of the j -th side;
 F_{kij} – force in the i -th wheel of the j -th side; $m_{ij}g$ – wheel weight

Уравнение движения колеса имеет вид

$$m_{ij}\ddot{z}_{ij} = -P_{yij}(h_{ij}) - P_{dij}(\dot{h}_{ij}) + P_{y.kij}(h_{ij}) + P_{d.kij}(\dot{h}_{ij}) - m_{ij}g. \quad (1)$$

Упругие и демпфирующие характеристики подвески и шины будем задавать в виде зависимостей [14–15]:

- упругие характеристики как зависимость упругой силы от прогиба;
- демпфирующие характеристики как зависимость демпфирующей силы от скорости прогиба.

Электромагнитный рекуператор можно представить в виде схемы на рис. 4.

Для получения значений токов необходимо обычную трехфазную вращающуюся математическую модель генератора преобразовать в модель линейного генератора.

После преобразований Парка и Кларка получаем математическую модель силы тока линейного электромагнитного генератора:

$$I_{sd} = I_{s\beta} \sin \varphi + I_{s\alpha} \cos \varphi; \quad (2)$$

$$I_{sq} = I_{s\beta} \cos \varphi - I_{s\alpha} \sin \varphi, \quad (3)$$

где φ – угол между направлением движения генератора и продольной осью, рад; $I_{s\beta}$ – ток в неподвижной фазе поперечной оси, А; $I_{s\alpha}$ – ток в неподвижной фазе продольной оси, А.

Уравнение динамического равновесия статора, описывающее состояние электрической машины и представляющее равенство статорного напряжения совокупности ЭДС и падения напряжения на активном и реактивном сопротивлениях статорных обмоток [16–17]:

$$U_{Sq} = -E + I_s R_s + j\omega(\vec{I}_{sd} L_{sd} + \vec{I}_{sq} L_{sq}), \quad (4)$$

где U_{Sq} – вектор напряжения статора, В; I_s – вектор тока статора, А; ω – скорость вращения осей координат; j – мнимая единица; \vec{I}_{sd} и \vec{I}_{sq} – осевые составляющие тока статора, А; L_{sd} и L_{sq} – индуктивность статора по осям d и q , Гн; R_s – активное сопротивление статора, Ом.

Усилие, которое возникает в результате работы рекуператора и является демпфирующей силой, можно определить по формуле

$$F = \frac{IUt}{s}, \quad (5)$$

где U – величина постоянного напряжения, возникающего в рекуператоре, В; I – величина постоянного тока, А; t – время с начала работы устройства, с; s – расстояние, пройденное штоком рекуператора, м.

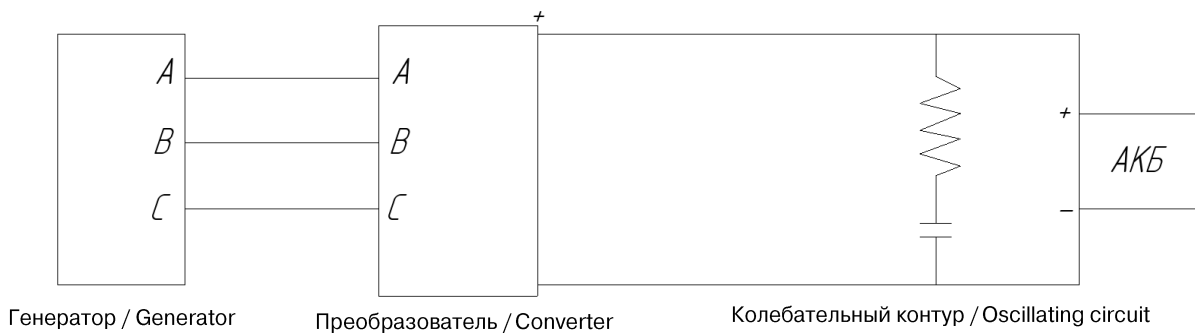


Рис. 4. Расчетная схема рекуперативной установки
Figure 4. Calculation scheme of the recuperative plant

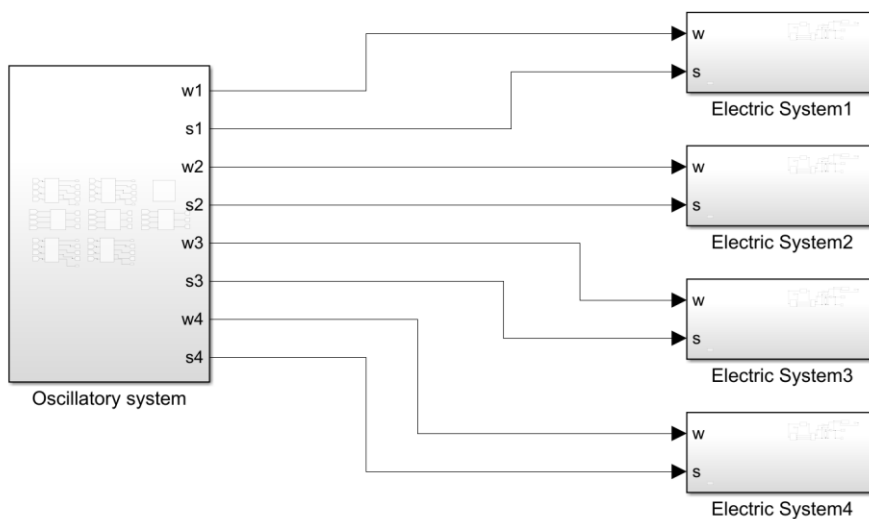


Рис. 5. Общая блок схема рекуперации электрической энергии
Figure 5. General block diagram of electrical energy recovery system

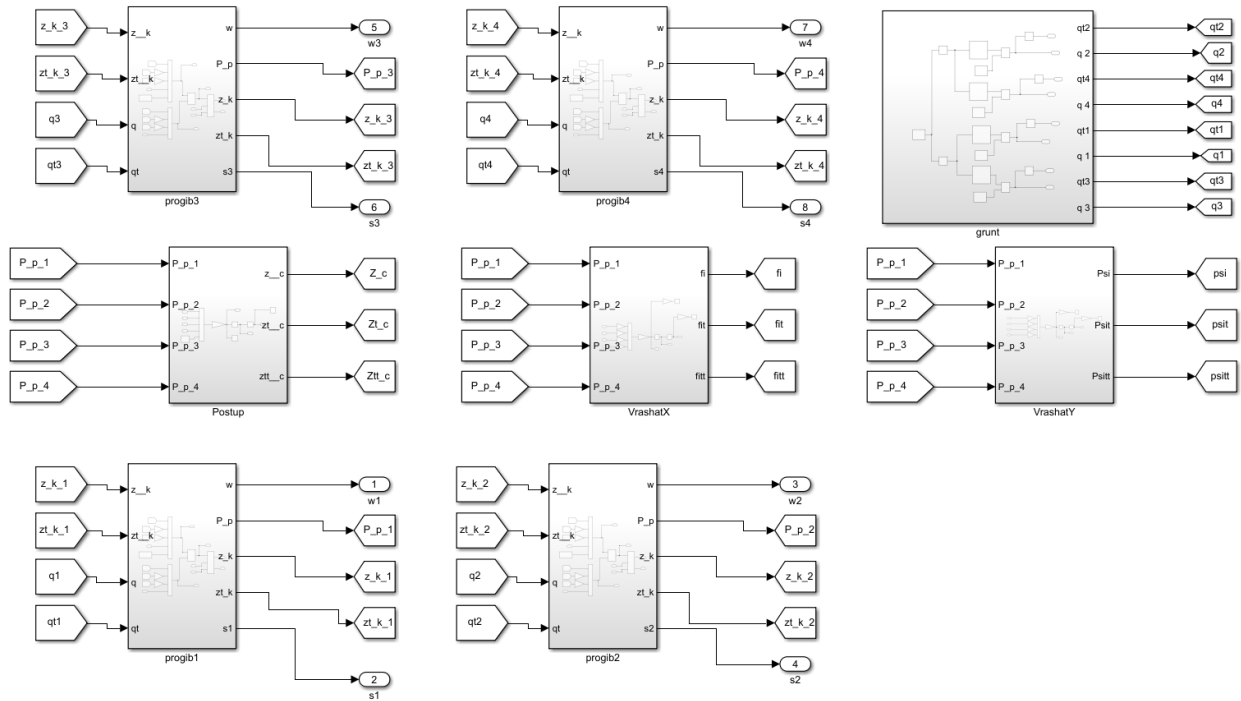


Рис. 6. Блок-схема колебаний транспортного средства
Figure 6. Block diagram of vehicle oscillation

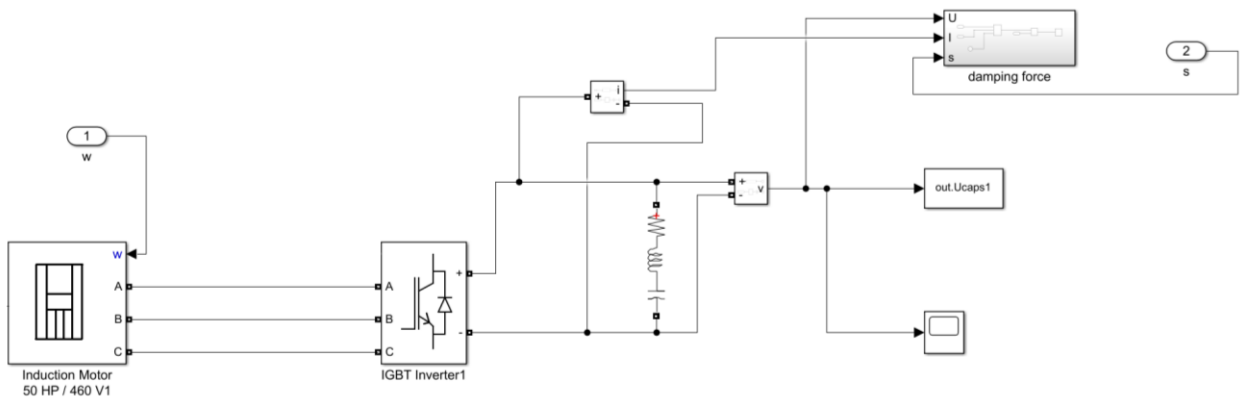


Рис. 7. Блок-схема рекуперативного устройства
Figure 7. Block diagram of a recuperative device

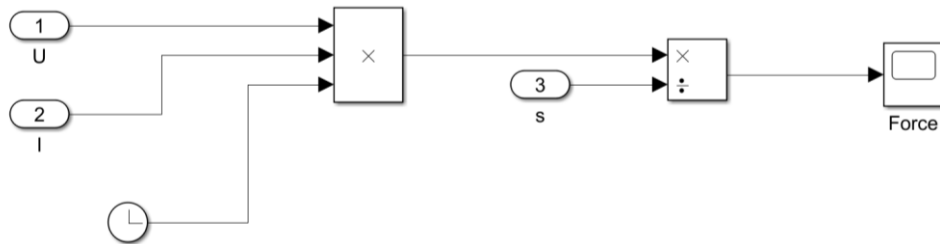


Рис. 8. Блок-схема демпфирующей силы рекуператора
Figure 8. Block diagram of the damping force of the recuperator

Имитационное моделирование в среде MATLAB Simulink позволяет на основе математической модели проводить всесторонние исследования разрабатываемой системы¹.

Общая блок схема рекуперации электрической энергии вследствие колебаний колес транспортного средства, созданная в среде MATLAB Simulink, представлена на рис. 5.

Блок определения скоростей движения штоков рекуператоров изображен на рис. 6, а блоки определения параметров рекуперации – на рис. 7–8.

2. Результаты и обсуждение

Результаты генерации электрической энергии при езде по разбитой грунтовой и по асфальтобетонной дорогам представлены на рис. 9 и 10 соответственно. Из сравнения полученных графиков видно, что при поездке по дороге с большим количеством неровностей амплитуда колебаний напряжения больше, чем при поездке по асфальтобетонной дороге, на 0,01 В. Среднее значение напряжения на одном рекуператоре составляет примерно 3,2 В, при использовании четырех рекуператоров суммарное напряжение составит около 12 В, что достаточно для зарядки аккумуляторов электродвигателя.

Рис. 11 демонстрирует результаты моделирования демпфирующей силы на рекуператоре. Величина демпфирующей силы на рекуператоре меньше, чем на амортизаторе, и, соответственно, плавность хода при замене амортизатора на рекуператор повысится, что видно на рис. 12 и 13. Из графиков можно сделать заключение, что период колебаний центра масс транспортного средства увеличился с 0,75 до 0,85 с, или на 12 %.

Результаты колебания центра масс транспортного средства без рекуператоров и при замене амортизаторов на рекуператоры представлены на рис. 12 и 13 соответственно. Колебания центра масс транспортного средства с рекуператорами, как это следует из рисунков, не имеют высокочастотные составляющие, что говорит о стабилизации процесса колебания центра масс транспортного средства.

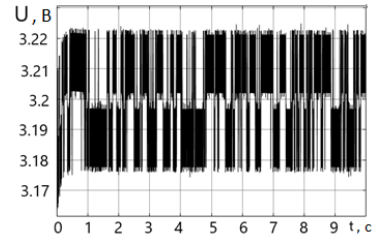


Рис. 9. Изменение напряжения на рекуперативном устройстве при поездке по разбитой грунтовой дороге
Figure 9. The results of voltage change on the recuperative device when driving on a broken dirt road

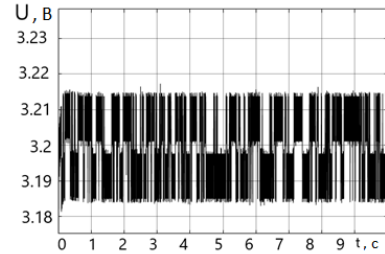


Рис. 10. Изменение напряжения на рекуперативном устройстве при поездке по асфальтобетонной дороге
Figure 10. The results of voltage change on the recuperative device when driving on an asphalt concrete road

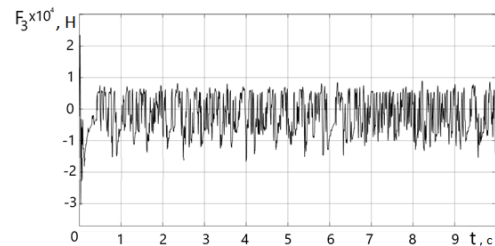


Рис. 11. Изменение демпфирующей силы на рекуператоре
Figure 11. Results of damping force on recuperator

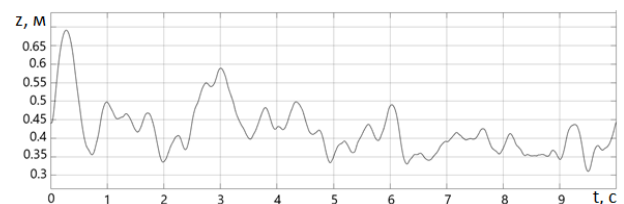


Рис. 12. Колебания центра транспортного средства масс без рекуператоров
Figure 12. The results of oscillation of the center of mass of the vehicle without recuperators

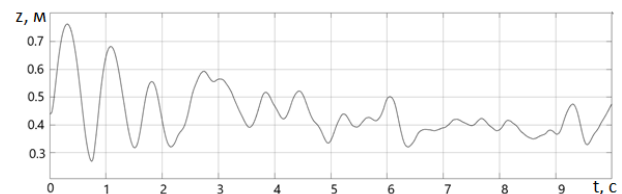


Рис. 13. Колебания центра масс транспортного средства с рекуператорами
Figure 13. The results of oscillation of the center of mass of the vehicle with recuperators

¹ MATLAB/Simulink. URL: <http://matlab.exponenta.ru> (дата обращения: 12.10.2022); MATLAB for Artificial Intelligence. URL: <http://www.mathworks.com> (дата обращения: 12.10.2022).

Заключение

Получены значения напряжения, генерируемого одним рекуператором электрического тока при движении транспортного средства по дорогам с различным дорожным покрытием. Кроме этого, получены значения демпфирующей силы на одном рекуператоре и колебания центра масс транспортного средства. Изменению подверглось только значение координаты опорной поверхности, другие параметры (электромагнитная индукция, масса транспортного средства, скорость движения) оставались одинаковыми для каждого опыта.

Сравнение результатов показало, что при поездке по дороге с большим количеством неровностей амплитуда колебаний напряжения больше, чем при поездке по асфальтобетонной дороге, на 0,01 В. Среднее значение напряжения на одном рекуператоре составляет примерно 3,2 В, при использовании четырех рекуператоров суммарное напряжение около 12 В, что достаточно для зарядки аккумуляторов для электродвигателя. Величина демпфирующей силы на рекуператоре больше, чем на амортизаторе, следовательно, плавность хода при замене амортизатора на рекуператор повысится, период колебаний центра масс транспортного средства увеличился с 0,75 до 0,85 с, что составило 12 %.

Список литературы

1. *Чижевский К.В., Сидоров В.Н., Лин З.Н.* Анализ международных ездовых циклов автомобиля // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 2 (58). С. 109–114.
2. *Becerra G., Alvarez-Icaza L., Flores De La Mota I., Mendoza-Soto J.L.* Simulation and optimization applied to power flow in hybrid vehicles // *Applied Simulation and Optimization*. 2017. Vol. 2. Pp. 185–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55810-3_7
3. *Cárcel-Carrasco J., Pascual-Guillamón M., Salas-Vicente F.* Analysis on the effect of the mobility of combustion vehicles in the environment of cities and the improvement in air pollution in Europe: a vision for the awareness of citizens and policy makers // *Land*. 2021. Vol. 10. P. 184. <https://doi.org/10.3390/land10020184>
4. *Insu C., Jongwon B., Junha P., Jinwook L.* Experimental evaluation and prediction algorithm suggestion for determining SOC of lithium polymer battery in a parallel hybrid electric vehicle // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8. Issue 9. Article 1641. <https://doi.org/10.3390/app8091641>

5. *Чижевский К.В., Сидоров В.Н.* Конструктивные особенности современных гибридных силовых установок // *Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2019): сборник статей XI международной научно-технической конференции*. Курск, 2019. С. 379–383.

6. *Раков В.А.* Исследование автопарка гибридных автомобилей // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2013. № 1 (31). С. 18–23.

7. *Hellgren J., Jonasson E.* Maximisation of brake energy regeneration in a hybrid electric parallel car // *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 2007. Vol. 1. No. 1. Pp. 95–121. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2007.014449>

8. *Раков В.А.* Повышение энергетической эффективности гибридных двигателей с параллельной схемой расположения элементов // *Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования: материалы международной научно-практической конференции*. Воронеж, 2014. С. 118–123.

9. *Киреев А.В., Кожемяка Н.М., Бурдюгов А.С.* Рекуперация энергии в подвеске транспортного средства // *Знание*. 2016. № 11–1 (40). С. 12–18.

10. *Стыров А.Е.* Подход к использованию рекуперации энергии в электромеханической активной подвеске транспортного средства // *Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета*. 2015. № 2 (80). С. 106–115.

11. *Посметьев В.И., Драпалюк М.В., Зеликов В.А.* Оценка эффективности применения системы рекуперации энергии в подвеске автомобиля // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2012. № 76 (2). С. 21–36.

12. *Заруцкий С.А., Власенко Е.А.* Автоматизация анализа данных экспериментальных исследований // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1 (48). С. 69.

13. *Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А., Сергеев П.С.* Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1969. 707 с.

14. *Калачев Ю.Н.* Векторное регулирование, заметки практика: методическое пособие. М.: ЭФО, 2013. 63 с.

15. *Раков В.А.* Методика оценки технического состояния гибридных силовых установок автомобиля // *Технология колесных и гусеничных машин*. 2015. № 2. С. 25–31.

16. *Куликов И.А., Селифонов В.В.* Математическое моделирование движения автомобиля с гибридной силовой установкой параллельного типа // *Труды НАМИ*. 2009. № 242. С. 67–84.

17. Черанёв С.В. Использование программного обеспечения для математического моделирования при проектировании автомобилей с гибридными силовыми установками // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 1. С. 116–120.

References

1. Chizhevskij KV, Sidorov VN, Lin ZN. Analysis of international driving cycles of motor vehicle. *Current Scientific Research in the Modern World*. 2020;(2):109–114. (In Russ.)

2. Becerra G, Alvarez-Icaza L, Flores De La Mota I, Mendoza-Soto JL. Simulation and optimization applied to power flow in hybrid vehicles. *Applied Simulation and Optimization*. 2017;2:185–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55810-3_7

3. Cárcel-Carrasco J, Pascual-Guillamón M, Salas-Vicente F. Analysis on the effect of the mobility of combustion vehicles in the environment of cities and the improvement in air pollution in Europe: a vision for the awareness of citizens and policy makers. *Land*. 2021;10(2):184. <https://doi.org/10.3390/land10020184>

4. Insu C, Jongwon B, Junha P, Jinwook L. Experimental evaluation and prediction algorithm suggestion for determining SOC of lithium polymer battery in a parallel hybrid electric vehicle. *Applied Sciences*. 2018;8(9):1641. <https://doi.org/10.3390/app8091641>

5. Chizhevskij KV, Sidorov VN. Design features of modern hybrid power plants. *Modern Automotive Materials and Technologies (SAMIT-2019): Collection of Articles of the XI International Scientific and Technical Conference*. Kursk; 2019. p. 379–383. (In Russ.)

6. Rakov VA. Hybrid car fleet research. *Transport na Alternativnom Toplivo*. 2013;(1):18–23. (In Russ.)

7. Hellgren J, Jonasson E. Maximization of brake energy regeneration in a hybrid electric parallel car. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 2007;1(1):95–121. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2007.014449>

8. Rakov VA. Improving the energy efficiency of hybrid engines with a parallel arrangement of elements. *Alternative Energy Sources in Road Transport: Problems and Prospects of Rational Use: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Voronezh; 2014. p. 118–123. (In Russ.)

9. Kireev AV, Kozhemyaka NM, Burdyugov AS. Energy recovery in the suspension of the vehicle. *Znanie*. 2016;(11–1):12–18. (In Russ.)

10. Styrov AE. Approach to the use of energy recovery in electromechanical active vehicle suspension. *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*. 2015;(2):106–115. (In Russ.) <http://doi.org/10.17212/2307-6879-2015-2-106-115>

11. Posmetiev VI, Drapalyuk MV, Zelikov VA. Estimation of efficiency of application of system recovery of energy in car suspender. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University*. 2012;(76):21–36. (In Russ.)

12. Zarutsky SA, Vlasenko EA. Data analysis automation in experimental research. *Engineering Journal of Don*. 2018;(1):69. (In Russ.)

13. Vinogradov NV, Goryainov FA, Sergeev PS. *Design of electrical machines*. Moscow: Energiya Publ.; 1969. (In Russ.)

14. Kalachev YuN. *Vector regulation, practice notes*. Moscow: EFO Publ.; 2013. (In Russ.)

15. Rakov VA. Assessment methods of maintaining the technical condition of hybrid power plants vehicles. *Technology of Wheeled and Tracked Machines*. 2015;(2):25–31. (In Russ.)

16. Kulikov IA, Selifonov VV. Modeling and simulation of parallel type hybrid electric vehicle. *Trudy NAMI*. 2009;(242):67–84. (In Russ.)

17. Cheranov SV. Hybrid electric vehicle development with mathematical simulation software application. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2011;(1):116–120. (In Russ.)

Сведения об авторах

Лин Зар Ни, аспирант, кафедра колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0000-0003-1839-3845, Scopus Author ID: 57936166500; zarnizn15@gmail.com

Скрынников Алексей Валерьевич, студент, кафедра колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0009-0006-2311-1936, eLIBRARY SPIN-код: 5982-4700; skrynnikovav@student.bmstu.ru

Чижевский Константин Владимирович, аспирант, кафедра колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0009-0002-8452-863X, Scopus Author ID: 57936166600, eLIBRARY SPIN-код: 4153-1097; konstantin201997@yandex.ru

Сидоров Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0009-0004-0214-1373, Scopus Author ID: 57222472914, eLIBRARY SPIN-код: 6162-2659; sidorov-kaluga@yandex.ru

About the authors

Zar Ni Lin, postgraduate student, Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1839-3845, Scopus Author ID: 57936166500; zarnizn15@gmail.com

Alexei V. Skrynnikov, student, Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-2311-1936, eLIBRARY SPIN-code: 5982-4700; skrynnikovav@student.bmstu.ru

Konstantin V. Chizhevsky, postgraduate student, Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-8452-863X, Scopus Author ID: 57936166600, eLIBRARY SPIN-code: 4153-1097; konstantin201997@yandex.ru

Vladimir N. Sidorov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-0214-1373, Scopus Author ID: 57222472914, eLIBRARY SPIN-code: 6162-2659; sidorov-kaluga@yandex.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-187-195
EDN: BRGJST
УДК 621.43.068

Научная статья / Research article

Токсичность бензинового двигателя для средств малой механизации

А.А. Ходяков , С.В. Хлопков ✉, Д.В. Истомин , Д.Р. Алибекова , А.А. Нарожный 

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

История статьи

Поступила в редакцию: 10 октября 2022 г.
Доработана: 15 декабря 2022 г.
Принята к публикации: 25 декабря 2022 г.

Ключевые слова:

газоанализатор, динамометрический стенд, бензин, смеси, спирт, доля, частота вращения, коленчатый вал, отработавшие газы, монооксид углерода, несгоревшие углеводороды, оксиды азота

Аннотация. Для решения задачи снижения загрязненности окружающей среды выбросами двигателя внутреннего сгорания исследована токсичность одноцилиндрового, четырехтактного, верхнеклапанного двигателя Biggs & Stratton. В качестве оценки токсичности использованы данные, регистрируемых (ИНФРАКАР 5МЗТ) в отработавших газах (ОГ) силового агрегата NO_x, СО и СН. Оценка токсичности двигателя, работающего под нагрузкой, проведена с помощью испытаний (динамометрический стенд CARTEC LPS 2510) оснащенного двигателем транспортного средства упрощенной конструкции (багги). Показано, что на присутствие в отработавших газах СО, СН и NO_x оказывает влияние не только наличие в бензине спирта, но и частота вращения коленчатого вала. Установлено, что доля СН в отработавших газах силового агрегата, работающего на бензине ниже предельно допустимого содержания углеводородов в ОГ не оснащенных системой нейтрализации бензиновых двигателей. Из данных, полученных при испытании на стенде, следует, что доля СН в отработавших газах мотора, работающего на бензине, в среднем на 48 % выше, чем в отработавших газах двигателя, питаемого смесью, состоящей из бензина и спирта. Показано, что значительное увеличение мощности на колесе не приводит к резкому возрастанию содержания СН в отработавших газах. Доля СН в отработавших газах в полученном интервале скоростей величина постоянная.

Для цитирования

Ходяков А.А., Хлопков С.В., Истомин Д.В., Алибекова Д.Р., Нарожный А.А. Токсичность бензинового двигателя для средств малой механизации // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 187–195. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-187-195>

Toxicity of a gasoline engine for small-scale mechanization

Aleksandr A. Khodyakov , Sergey V. Khlopkov ✉,
Danil V. Istomin , Djeqran R. Alibekova , Alexey A. Narozhnyy 

RUDN University, Moscow, Russian Federation
✉ khlopkov-sv@rudn.ru

Article history

Received: October 10, 2022
Revised: December 15, 2022
Accepted: December 25, 2022

Abstract. The single-cylinder, four-stroke, overhead valve Biggs & Stratton engine was studied for the possible toxicity with the view of solving the environmental pollution problem related to the internal combustion engine emissions. As an assessment of toxicity, the data recorded (INFRACAR 5M3T)



Keywords:

gas analyzer, dynamometer, gasoline-alcohol mixtures, proportion, crankshaft speed, exhaust gases, carbon monoxide, unburned hydrocarbons, nitrogen oxides

in the exhaust gases of the power unit NO_x, CO and CH was used. Evaluation of the toxicity of the engine running under load was carried out by testing (CARTEC LPS 2510 dynamometer) an engine-equipped vehicle of simplified design (buggy). It was shown that the presence of CO, CH and NO_x in the exhaust gases is affected not only by the presence of alcohol in gasoline, but also by the crankshaft speed. It was found that the proportion of CH in the exhaust gases of the power unit running on gasoline is lower than the maximum allowable content of hydrocarbons in the exhaust gases of gasoline engines not equipped with a neutralization system. According to the data obtained from bench tests, it follows that the proportion of CH in the exhaust gases of a gasoline-fueled engine is on average 48% higher than in the exhaust gases of an engine fed with a gasoline-alcohol mixture. It was shown that a significant increase in power at the wheel does not lead to a sharp increase in the CH content in the exhaust gases. The proportion of CH in the exhaust gases in the obtained speed range is a constant value.

For citation

Khodyakov AA, Khlopkov SV, Istomin DV, Alibekova DR, Narozhnyy AA. Toxicity of a gasoline engine for small-scale mechanization. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):187–195. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-187-195>

Введение

Широкое использование в садовой технике (газонокосилках, культиваторах), электрических генераторах, картингах и багги двигателей Briggs & Stratton, не оснащенных каталитическим нейтрализатором, ставит задачу определения токсичности отработавших газов (ОГ) силового агрегата.

Проведение исследований, связанных с анализом содержания в отработавших газах токсичных компонентов (CO, CH, NO_x)¹ [1–2], необходимо не только для диагностирования неисправностей двигателей Briggs & Stratton, но и для предотвращения увеличения токсичных выбросов [3–6], вызванных нарушениями нормальной работы мотора [7–13]. Кроме неисправностей, приводящих к возрастанию токсичности ОГ, влияние на содержание в отработавших газах CO, CH, NO_x может оказывать и само топливо [14]. Поэтому необходимо определить содержание CO, CH, NO_x в отработавших газах двигателя, работающего на бензине. Оценка влияния топлива на токсичность ОГ проводилась на том же двигателе, но работающем уже не на бензине, а на смесях бензина со спиртом.

1. Экспериментальная часть

Объектами исследования были пробы бензина марки АИ-98 (Б-1) и смесь АИ-98 с изопропиловым спиртом (C₃H₈O, абсолютированный ГОСТ 9805–84), содержащая 5 и 10 % C₃H₈O (СМ-5, СМ-10).

Испытанию подвергали двигатель, установленный на легкий четырехколесный автомобиль, упрощенной конструкции (багги). Трансмиссия транспортного средства состояла из цепной (главной) передачи и вариатора. Пробы бензина и смеси, содержащие C₃H₈O, объемом не выше 150 мл заливали в топливный бак одноцилиндрового, четырехтактного, верхнеклапанного двигателя (Briggs & Stratton) мощностью 7,4 кВт (крутящий момент 3600 об·мин⁻¹). Рабочий объем двигателя 306 см³.

Для определения изменений содержания в отработавших газах токсичных компонентов, связанных с работающим под нагрузкой двигателем, использовали динамометрический стенд CARTEC LPS 2510. Испытания проводили в подпрограмме *F*-const. В режиме *F*-const, согласно технической документации, автомобиль при фиксированном (постоянном) сопротивлении движению колес должен развивать максимально возможную мощность. Протокол испытаний режима *F*-const содержит следующие данные: сопротивление на колесе, мощность на колесе, скорость, обороты двигателя, тяговое усилие. Одновременно при испытании на стенде регистрировали содержание в ОГ CO, CH, NO_x.

¹ Горбунов В.В., Патрахальцев Н.И. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие. М.: Изд-во РУДН, 1998. 214 с.; Альферович В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания: учебно-методическое пособие: в 2 ч. Ч. 1. Анализ состава отработавших газов. Минск: БНТУ, 2016. 54 с.; Поклад Л.Н. Контроль токсичности отработавших газов автомобилей: пособие для лабораторных работ по дисциплине «Транспорт и окружающая среда». Минск: БНТУ, 2012. 34 с.

Контроль содержания в отработавших газах двигателя Briggs & Stratton монооксида углерода (CO), несгоревших углеводородов (CH) и оксидов азота (NO_x) проводили газоанализатором ИНФРА-КАР 5МЗТ (класс прибора 0). В табл. 1 приведен диапазон измеряемых значений CO, CH и NO_x и пределы допускаемых погрешностей.

Подготовку прибора к работе и проведение контроля содержания в ОГ токсичных компонентов осуществляли, руководствуясь соответствующей технической документацией. Так, например, устройство забора пробы (зонд) газо-

анализатора устанавливали в выхлопную трубу транспортного средства, согласно инструкции, на глубину не менее 300 мм от среза и фиксировали устройство забора пробы специальным зажимом. Кроме измерения CO, CH, NO_x регистрировали также (тахометром) обороты двигателя (*n*; частота вращения коленчатого вала). Измерения выполняли при работе мотора (не менее 2 мин) в нагруженном (режим *F-const*) и не нагруженном (режим холостого хода) состоянии. Силовой агрегат предварительно прогревали.

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 CO, %	От 0 до 5	±0,03	±3
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 maximum permissible error limits

Measured value	Measurement range	Maximum permissible error limits	
		Absolute	Relative
Volume fraction of CO, %	From 0 to 5	±0.03	±3
Volume fraction of CH, ppm	From 0 to 2000	±10	±5
Volume fraction of NO _x , ppm	From 0 to 4000	±100	±10

2. Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлены данные, полученные при работе двигателя в режиме холостого хода. Из сопоставления данных следует, что объемная доля CO и CH в отработавших газах при сгорании бензина выше их содержания в ОГ, образующихся при работе двигателя на смесях со спиртом. Параметр φ оксидов азота в ОГ, наоборот, возрастает. Причем максимальное значение NO_x наблюдается для бензина с 10 % C₃H₈O и при

работе двигателя на более низких оборотах. Это свидетельствует, что на присутствие в отработавших газах CO, CH и NO_x оказывает влияние не только наличие в бензине спирта, но и частота вращения коленчатого вала.

Для определения тесноты связи между φ и концентрацией C₃H₈O в топливе, а также между φ и *n* (частота вращения коленчатого вала) к представленным в табл. 2 данным применялся корреляционный анализ (рис. 1).

Таблица 2

Объемная доля φ CO, CH и NO_x в отработавших газах при работе двигателя в режиме холостого хода

Топливо	Содержание в топливе C ₃ H ₈ O, %	Обороты двигателя, мин ⁻¹	φ(CO), %	φ(CH), млн ⁻¹	φ(NO _x), млн ⁻¹
Б-1	0	2450	2,8	361	157
СМ-5	5	1840	1,5	149	234
СМ-10	10	1750	0,4	104	315

Table 2

Volumetric fraction φ of CO, CH and NO_x in exhaust gases when the engine is idling

Fuel	C ₃ H ₈ O content in fuel, %	Engine speed, min ⁻¹	φ(CO), %	φ(CH), ppm ⁻¹	φ(NO _x), ppm ⁻¹
В-1	0	2450	2.8	361	157
СМ-5	5	1840	1.5	149	234
СМ-10	10	1750	0.4	104	315

Величины представленных в таблицах коэффициентов корреляции (r) выше 0,9 (рисунки). Такие значения параметра r по количественно-качественной шкале Чеддока характеризуют связь между n и φ , между содержанием в бензине спирта и объемными долями CO, CH, NO_x как очень сильную. Аналогичная связь существует и в ряду $\varphi(\text{CO}) - \varphi(\text{CH})$, $\varphi(\text{CO}) - \varphi(\text{NO}_x)$, а также между $\varphi(\text{CH})$ и $\varphi(\text{NO}_x)$.

Статистическую оценку коэффициентов корреляции проводили, сравнивая расчетные значения $r_{\text{расч}}$ с критической величиной $r_{\text{крит}}$. Оказалось, что свидетельствующее о значимой линейной связи $|r_{\text{расч}}| > r_{\text{крит}}$ ($r_{\text{крит}} = 0,997$ при уровне значимости 0,05) наблюдается для пар n -CH, $\varphi(\text{CO}) - \varphi(\text{NO}_x)$, содержание спирта – $\varphi(\text{NO}_x)$, содержание спирта – $\varphi(\text{CO})$. Из этих четырех пар только содержание в отработавших газах CH связано с характеристикой (частотой вращения коленчатого вала) силового агрегата. Поэтому испытание двигателя в режиме F -const (под нагрузкой) с одновременной регистрацией в отработавших газах CO, CH и NO_x проводили при $n = 1636 \pm 52 \text{ мин}^{-1}$ ($\pm 3 \%$), а показателем, по которому оценивали токсичность двигателя (работающего на бензине и на смеси бензина со спиртом), было содержание в ОГ CH.

В табл. 3, 4 представлены данные, полученные при испытании багги на стенде CARTEC LPS 2510 в режиме F -const. Из сопоставления данных следует, что доля CH в ОГ двигателя, работающего на бензине, в среднем на 48 % выше, чем в отработавших газах мотора, питаемого смесью, состоящей из бензина и спирта. Аналогичный результат получен при работе силового агрегата без нагрузки (в режиме холостого хода). Доля CH в отработавших газах двигателя, работающего на бензине, выше параметра φ , полученного при работе мотора на смесях (табл. 2). Это соответствует приводимым в литературе сведениям о снижении выбросов CH, которое является следствием более полного, чем бензин, сгорания смесей бензина со спиртом [10–13].

Данные			
Обороты	CO	CH	NO _x
2450	2,8	361	157
1840	1,5	149	234
1750	0,4	104	315

Корреляция				
	Обороты	CO	CH	NO _x
Обороты	1			
CO	0,936919933	1		
CH	0,998930926	0,952076931	1	
NO _x	-0,91318055	-0,998035571	-0,9310447	1

Данные			
Содержание спирта	CO	CH	NO _x
0	2,8	361	157
5	1,5	149	234
10	0,4	104	315

Корреляция				
	Содержание спирта	CO	CH	NO _x
Содержание спирта	1			
CO	-0,998844598	1		
CH	-0,93627827	0,952076931	1	
NO _x	0,999893197	-0,998035571	-0,9310447	1

Корреляционный анализ данных, выполненный с помощью табличного процессора Microsoft Office Excel

Data			
Wheeling	CO	CH	NO _x
2450	2,8	361	157
1840	1,5	149	234
1750	0,4	104	315

Correlation				
Wheeling	Wheeling	CO	CH	NO _x
	1			
CO	0,936919933	1		
CH	0,998930926	0,952076931	1	
NO _x	-0,91318055	-0,998035571	-0,9310447	1

Data			
Alcohol content	CO	CH	NO _x
0	2,8	361	157
5	1,5	149	234
10	0,4	104	315

Correlation				
Alcohol content	Alcohol content	CO	CH	NO _x
	1			
CO	-0,998844598	1		
CH	-0,93627827	0,952076931	1	
NO _x	0,999893197	-0,998035571	-0,9310447	1

Correlation data analysis performed using Microsoft Office spreadsheet processor

Таблица 3

Сопrotивление, мощность на колесе, скорость, тяговое усилие и объемная доля CH в отработавших газах двигателя, работающего на бензине АИ-98

Сопrotивление на колесе, Н·м	Мощность на колесе, кВт	Скорость, км·час ⁻¹	Тяговое усилие, Н	φ(CH), млн ⁻¹
20	1,5	43,1	120	371
30	1,8	36,5	190	369
40	2,4	34,5	250	357

Table 3

Resistance, power to the wheel, speed, tractive effort and volumetric fraction of CH in the exhaust gases of an engine running on AI-98 gasoline

Wheel resistance, N·m,	Power to the wheel, kW	Speed, km·hour ⁻¹	Tractive effort, Н	φ(CH), ppm ⁻¹
20	1.5	43.1	120	371
30	1.8	36.5	190	369
40	2.4	34.5	250	357

Таблица 4

Сопrotивление, мощность на колесе, скорость, тяговое усилие и объемная доля CH в отработавших газах двигателя, работающего на бензине с 10 % изопропилового спирта

Сопrotивление на колесе, Н·м	Мощность на колесе, кВт	Скорость, км·час ⁻¹	Тяговое усилие, Н	φ(CH), млн ⁻¹
20	1,3	39,1	125	186
30	1,6	34,1	190	189
40	2,4	31,0	253	191

Table 4

Resistance, power to the wheel, speed, tractive effort and volumetric fraction of CH in the exhaust gases of an engine running on 10% isopropyl alcohol gasoline

Wheel resistance, N·m,	Power to the wheel, kW	Speed, km·hour ⁻¹	Tractive effort, H	φ(CH), ppm ⁻¹
20	1.3	39.1	125	186
30	1.6	34.1	190	189
40	2.4	31.0	253	191

Полученные значения $\varphi(\text{CH}) = 357\text{--}371 \text{ млн}^{-1}$ ниже предельно допустимого (нормированного) содержания углеводородов в ОГ для двигателей, работающих на бензине и не оснащенных системой нейтрализации ($600\text{--}1200 \text{ млн}^{-1}$).

В ходе испытаний в режиме $F\text{-const}$ (согласно техническому описанию динамометрического стенда CARTEC LPS 2510) багги должен развивать максимально возможную мощность (N_k) при фиксированном (постоянном) сопротивлении движению колес (P_k).

При увеличении P_k максимально возможная мощность возрастает с 1,3 до 2,4 кВт, то есть на 46 %, а скорость меняется на ~ 20 % (табл. 3, 4). Изменение доли CH в отработавших газах с ростом N_k (и соответственно с изменением скоро-

сти) составило всего 4 %. Это ниже предела допускаемой погрешности измерения CH, равной ± 5 % (табл. 1). Следовательно, значительное увеличение N_k не приводит к резкому возрастанию содержания CH в отработавших газах. Доля CH в ОГ в полученном интервале скоростей величина постоянная.

Для оценки влияния присутствующего в бензине спирта на содержание в отработавших газах NO_x проведены испытания одноцилиндрового, четырехтактного бензинового двигателя LIFAN 170 F мощностью 5,1 кВт (крутящий момент 3600 об·мин^{-1}) (табл. 5). Этот силовой агрегат так же, как и двигатель Briggs & Stratton, устанавливается на мобильных энергетических средствах малой механизации.

Таблица 5

Объемная доля NO_x в отработавших газах при работе двигателя LIFAN 170 F в режиме холостого хода на бензине и смеси бензина со спиртом

Токсичный компонент ОГ	Обороты двигателя, мин ⁻¹									
	Бензин					Смесь бензина с 20% изопропилового спирта				
	1640	1950	2240	2480	3430	1815	1928	2213	2429	3598
$\varphi(\text{NO}_x), \text{ млн}^{-1}$	18	41	63	84	182	8	13	50	61	152

Table 5

Volumetric fraction of NO_x in the exhaust gases when the LIFAN 170 F engine is idling on gasoline and gasoline-alcohol mixture

Toxic component of the exhaust gases	Engine speed, min ⁻¹									
	Gasoline					Mixture of gasoline with 20% isopropyl alcohol				
	1640	1950	2240	2480	3430	1815	1928	2213	2429	3598
$\varphi(\text{NO}_x), \text{ млн}^{-1}$	18	41	63	84	182	8	13	50	61	152

Испытание LIFAN 170 F проводилось с целью получения результатов, которые могут быть некоторой коррекцией данных $\varphi(\text{NO}_x)$, полученных при испытании двигателя Briggs & Stratton (см. табл. 2).

Из сопоставления данных (табл. 5) следует, что содержание NO_x в отработавших газах двигателя, работающего на бензине, выше (на 21–68 %), чем $\varphi(\text{NO}_x)$ в ОГ мотора, питаемого смесью бензина со спиртом. При этом наблюдается рост

содержания NO_x в ОГ с увеличением частоты вращения коленчатого вала.

Тесноту связи между $\varphi(\text{NO}_x)$ и частотой вращения коленчатого вала оценивали коэффициентом корреляции. Коэффициент корреляции r между $\varphi(\text{NO}_x)$ и n для двигателя, работающего на бензине, так же, как и для мотора, питаемого смесью, составил 0,99. Это значение статистически значимо, так как $r_{\text{крит}}$ при уровне значимости 0,05 составляет 0,878 [14].

Установление функциональной зависимости $\varphi(\text{NO}_x)$ от частоты вращения коленчатого вала проводили с помощью регрессионного анализа (статистический аналитический метод, модель парной линейной регрессии).

В табл. 6, 7 приведены результаты выполненного в табличном процессоре Microsoft Office Excel регрессионного анализа (F -критерий Фишера; R^2 – коэффициент детерминации).

Расчет средней относительной ошибки аппроксимации (\bar{A} , %) проводили по формуле

$$\bar{A} = \frac{100}{\bar{y}_i} \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}},$$

где \bar{y}_i – среднее арифметическое значение фактического результативного признака; y_i – фактическое значение результативного признака; \hat{y}_i – теоретическое значение результативного признака.

Из сопоставления критических и расчетных значений критерия Фишера следует, что уравнения регрессии адекватны ($F_{\text{расч}} > F_{\text{крит}}$). Точность математической модели (\bar{A}) составила 6 % для данных, полученных при работе двигателя на бензине, и 8 % для мотора, питаемого смесью бензина с 20 % изопропилового спирта (табл. 6, 7). Эти значения \bar{A} обладают точностью, которая является достаточной, чтобы подобранную к исходным данным модель считать результативной.

Значение R^2 , так же как и r для данных, полученных при работе двигателя на смеси, близки к 1, то есть линейная связь между $\varphi(\text{NO}_x)$ и n сильная, 99 % значений $\varphi(\text{NO}_x)$ обусловлено влиянием на образование токсичного компонента частоты вращения коленчатого вала двигателя, 1 % данных зависит от других, не включенных в модель, факторов.

Таблица 6

Характеристика регрессионной модели для данных ($\hat{y} = \varphi(\text{NO}_x)$; $x = n$), полученных при работе двигателя LIFAN 170 F в режиме холостого хода на бензине

Уравнение регрессии $\hat{y} = 0,0926x - 139,77$	\bar{A} , %	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{крит}}$	R^2
	6	441,2	7,7	0,9932

Table 6

Regression model characteristics for the data ($\hat{y} = \varphi(\text{NO}_x)$; $x = n$), obtained when the LIFAN 170 F engine is idling on gasoline

Regression equation $\hat{y} = 0.0926x - 139.77$	\bar{A} , %	$F_{\text{estimated}}$	F_{critical}	R^2
	6	441.2	7.7	0.9932

Таблица 7

Характеристика регрессионной модели для данных ($\hat{y} = \varphi(\text{NO}_x)$; $x = n$), полученных при работе двигателя LIFAN 170 F в режиме холостого хода на смеси бензина с 20 % изопропилового спирта

Уравнение регрессии $\hat{y} = 0,0809x - 137,0319$	\bar{A} , %	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{крит}}$	R^2
	8	366,3	7,7	0,9919

Table 7

Regression model characteristics for the data ($\hat{y} = \varphi(\text{NO}_x)$; $x = n$), obtained when the operation of the LIFAN 170 F engine is idling on a mixture of gasoline with 20% isopropyl alcohol

Regression equation $\hat{y} = 0.0809x - 137.0319$	\bar{A} , %	$F_{\text{estimated}}$	F_{critical}	R^2
	8	366.3	7.7	0.9919

Заключение

Представленные в работе результаты исследований показали, что на присутствие в отработавших газах CO , CH и NO_x оказывает влияние

не только наличие в бензине спирта, но и частота вращения коленчатого вала. Установлено, что доля CH в отработавших газах силового агрегата, работающего на бензине, ниже предельно

допустимого содержания углеводородов в ОГ, не оснащенных системой нейтрализации бензиновых двигателей. Из данных, полученных при испытании на стенде, следует, что доля СН в ОГ двигателя, работающего на бензине, в среднем на 48 % выше, чем в отработавших газах мотора, питаемого смесью, состоящей из бензина и спирта. Показано, что значительное увеличение мощности на колесе не приводит к резкому возрастанию содержания СН в отработавших газах. Доля СН в ОГ в полученном интервале скоростей величина постоянная.

Список литературы

1. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1973. 200 с.
2. Вершинин Н.Н., Шумилин А.Д., Волкова А.С., Авдонина Л.А. Исследование влияния перехода автомобильного транспорта на экологический стандарт «Евро-5» на воздушный бассейн города // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2 (18). С. 83–89.
3. Христофоров Е.Н. Транспорт и окружающая среда. Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2012. 196 с.
4. Кирюшин И.Н., Купанов А.С., Шабанкин М.П. Исследование токсичности отработавших газов двигателя внутреннего сгорания // Новые технологии в учебном процессе и производстве: материалы XVIII Международной научно-технической конференции (Рязань, 17–19 апреля 2019 г.) / под ред. А.А. Бакулина. Рязань, 2020. С. 342–346.
5. Мусаелянц Г.Г. Павленко Е.А., Сысоев Д.К. Способ диагностирования бензиновых двигателей с впрыском топлива с выявлением конкретных неисправностей // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15. № 1. С. 69–76.
6. Невзоров В.В., Сухопаров С.И., Овчинников В.М. Исследование взаимосвязи экологических параметров двигателя внутреннего сгорания с техническими характеристиками цилиндропоршневой группы // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. Промышленность. 2007. № 8. С. 85–90.
7. Соломин В.В., Шабанов А.В., Шабанов А.А., Килыушник В.М., Младенский А.В. Анализ методов и средств экологического контроля выбросов вредных веществ отработавших газов автомобилей // Известия МГТУ МАМИ. 2016. № 4 (30). С. 82–89.
8. Потетня К.М., Садов А.А. Проведения исследований выхлопных газов с использованием современных газоанализаторов // Научно-технический вестник. Технические системы в АПК. 2018. № 1 (1). С. 12.
9. Базарский О.В., Шнилева Е.В. Экологостатистические характеристики автомобильного двигателя // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 6. С. 11–12.

10. Смоленская Н.М., Смоленский В.В. Токсичность отработавших газов в бензиновых двигателях при работе на сжатом природном газе // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2018. Т. 18. № 4. С. 57–65. <http://doi.org/10.14529/engin180406>

11. Лаврик А.Н., Богданов С.Н., Теремов А.С. Особенности рабочего цикла при работе двигателя на бензаноле // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2008. № 23 (123). С. 77–80.

12. Шкаликова В.П. Некоторые эксплуатационные характеристики работы двигателей на топливах с добавкой спирта // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2004. № 2. С. 5–7.

13. Карпов С.А., Кунашев Л.Х., Царев А.В., Кануштин В.М. Применение алифатических спиртов в качестве экологически чистых добавок в автомобильные бензины // Нефтегазовое дело. 2006. № 2. С. 48.

14. Бараз В.Р., Пегашкин В.Ф. Использование MS EXCEL для анализа статистических данных. Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014. 181 с.

References

1. Zvonov VA. *Toxicity of internal combustion engines*. Moscow: Standartinform Publ.; 1973. (In Russ.)
2. Vershinin NN, Shumilin AD, Volkova AS, Avdonina LA. Study of the impact of the transition of road transport to the environmental standard “Euro-5” on the air basin of the city. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2017;(2):83–89. (In Russ.)
3. Khristoforov EN. *Transport and environment*. Bryansk: Publishing House of the Bryansk State Agricultural Academy; 2012. (In Russ.)
4. Kiryushin IN, Kupanov AS, Shabankin MP. Investigation of the toxicity of exhaust gases of internal combustion engines. In: Bakulin AA. (ed.) *New Technologies in the Educational Process and Production: Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference (Ryazan, 17–19 April 2019)*. Ryazan; 2020. p. 342–346. (In Russ.)
5. Musaeliants GG, Pavlenko EA, Sysoev DK. A method for diagnosing gasoline engines with fuel injection with the identification of specific faults. *Bulletin of SibADI*. 2018;15(1):69–76. (In Russ.)
6. Nevzorov VV, Sukhoparov SI, Ovchinnikov VM. Investigation of the relationship between the environmental parameters of an internal combustion engine and the technical characteristics of the cylinder-piston group. *Bulletin of the Polotsk State University. Series B: Applied Sciences. Industry*. 2007;(8):85–90. (In Russ.)
7. Solomin VV, Shabanov AV, Shabanov AA, Kilyushnik VM, Mladensky AV. Analysis of methods and means of environmental control of emissions of

harmful substances from car exhaust gases. *Proceedings of MSTU MAMI*. 2016;(4):82–89. (In Russ.)

8. Potetnya KM, Sadov AA. Carrying out researches of exhaust gases with the use of modern gas analyzers. *Scientific and Technical Bulletin. Technical Systems in the Agro-Industrial Complex*. 2018;(1):12. (In Russ.)

9. Bazarsky OV, Shpileva EV. Ecological and statistical characteristics of an automobile engine. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2011;7(6):11–12. (In Russ.)

10. Smolenskaya NM, Smolensky VV. Toxicity of exhaust gases in gasoline engines powered with compressed natural gas and gasoline. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*. 2018; 18(4):57–65. (In Russ.) <http://doi.org/10.14529/engin180406>

11. Lavrik AN, Bogdanov SN, Terebov AS. Features of the working cycle when the engine is running on benzanol. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical Engineering Industry*. 2008;23(123):77–80. (In Russ.)

12. Shkalikova VP. Some performance characteristics of engines running on fuels with the addition of alcohol. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2004; (2):5–7. (In Russ.)

13. Karpov SA, Kunashev LKh, Tsarev AV, Kapustin VM. The use of aliphatic alcohols as environmentally friendly additives in motor gasolines. *Oil and Gas Business*. 2006;(2):48. (In Russ.)

14. Baraz VR, Pegashkin VF. *Using MS EXCEL to analyze statistical data*. Nizhny Tagil: NTI (branch) UrFU; 2014. (In Russ.)

Сведения об авторах

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

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, 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, 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

Danil V. Istomin, master's student, Department of Transport, Academy of Engineering, 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, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3541-9517; 1032212205@rudn.ru

Alexey A. Narozhnyy, master's student, Department of Transport, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3395-2871; 1032212206@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-2-196-205
EDN: BANQEJ
УДК 550.832

Научная статья / Research article

Результаты дистанционного анализа по поиску нового типа залежей нефти и газа в Оренбургской области

С.В. Пичугин^a , Е.М. Котельникова^b , В.М. Усова^b ✉, А.А. Усов^b

^aГеологоразведочная компания «ОЗГЕО», Москва, Российская Федерация

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ usova-vm@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 26 декабря 2022 г.
Доработана: 17 февраля 2023 г.
Принята к публикации: 27 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

комплексный дистанционный анализ, колганская толща, терригенные коллекторы, верхний девон, углеводороды

Аннотация. В западной части Оренбургской области с целью выявления литологических и стратиграфических ловушек проведены дистанционные исследования на углеводороды. Для выявления месторождений углеводородов применялся метод по технологии CRS (комплексного дистанционного анализа). На дневной поверхности изучаемого района выделены как спектральные аномалии, связанные с известными антиклинальными, структурными, рифовыми и литологическими залежами известных месторождений, так и лентообразные залежи, идентифицируемые как палеоруслу верхнего девона, представленные терригенными отложениями. При сопоставлении спектральных углеводородных аномалий, выделенных в разных диапазонах, удалось выявить их над известными месторождениями. Подтверждена перспективность ряда структур, ранее выявленных при сейсмических работах, что говорит о наличии в них углеводородов. Кроме того, на севере изучаемой площади в бассейнах современных рек Моховой и Адамовки выделены лентообразные аномалии. Не исключено, что эти литологически экранованные залежи могут представлять новый тип залежей в данном районе.

Для цитирования

Пичугин С.В., Котельникова Е.М., Усова В.М., Усов А.А. Результаты дистанционного анализа по поиску нового типа залежей нефти и газа в Оренбургской области // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 2. С. 196–205. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-196-205>

Results of remote analysis to find a new type of oil and gas deposits in the Orenburg region

Sergey V. Pichugin^a , Elena M. Kotelnikova^b , Valentina M. Usova^b ✉, Anton A. Usov^b

^aGeological Exploration Company “OZGEO”, Moscow, Russian Federation

^bRUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ usova-vm@rudn.ru

Article history

Received: December 26, 2022
Revised: February 17, 2023
Accepted: February 27, 2023

Abstract. Remote hydrocarbon studies were conducted in the western part of the Orenburg region in order to identify lithological and stratigraphic traps. The main research method was CRS technology (complex sensing) to find hydrocarbon deposits. On the surface of the study area,



Keywords:

complex remote analysis, Kolganian stratum, terrigenous reservoirs, Upper Devonian, hydrocarbons

were identified both spectral anomalies associated with the known anticlinal, structural, reef and lithological deposits of known deposits, and ribbon-like deposits, which were recognised as Upper Devonian paleorusses, represented by terrigenous deposits. When comparing the spectral hydrocarbon anomalies detected in different ranges, it was possible to discover them over known deposits. The promise of a number of structures previously identified during seismic work was confirmed, which indicates the presence of hydrocarbons in them. In addition, in the north of the study area in the basins of the modern Mokhovaya and Adamovka rivers, ribbon-like anomalies were observed. It is possible that these lithologically shielded deposits may represent a new type of deposits in the area.

For citation

Pichugin SV, Kotelnikova EM, Usova VM, Usov AA. Results of remote analysis to find a new type of oil and gas deposits in the Orenburg region. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(2):196–205. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-196-205>

Введение

Постепенное истощение углеводородных ресурсов характерно как для России, так и для других стран мира. Хотя оценки ресурсов и запасов нефти и газа в России пока не вызывают опасений их истощения, по отдельным областям России наблюдается устойчивое снижение объемов их добычи. Оренбургская область не является исключением.

Оренбургская область входит в число наиболее промышленно развитых регионов России. Ведущее место в области занимает добыча и переработка нефти и природного газа. Стоит отметить, что отложения девонского возраста являются достаточно перспективными практически на всей территории Оренбургской области. Государственным балансом запасов полезных ископаемых (нефть) на 1 января 2022 г. в Оренбургской области учтено 302 месторождения (254 нефтяных, 28 газонефтяных, 2 нефтегазовых и 18 нефтегазоконденсатных) с разбуренными технологическими извлекаемыми запасами нефти: на разрабатываемых месторождениях кат. А+В1 – 870,693 млн т, на разведываемых кат. С1 – 132,960 млн т, всего – кат. А+В1+С1 – 1003,653 млн т¹.

В Оренбургской области добыча жидких углеводородов (УВ) постепенно снижается: если в 2013 г. добывалось 23,2 млн т нефти, 0,5 млн т

конденсата, то в 2020 г. добыто 21,6 млн т нефти². Следовательно, для восстановления добычи нефти и газа в Оренбургской области требуется выявление залежей нефти нового типа. Такими объектами, по нашему мнению, могут быть залежи нефти в терригенных отложениях, локализованные в пределах палеодолин верхнедевонской речной сети. Характерным поисковым признаком указанных объектов может быть лентообразный характер искомых углеводородных залежей.

Однако задача выявления новых объектов нефти и газа в Оренбургской области без проведения весьма затратных сейсмических и буровых работ является весьма проблематичной. В данном случае могут быть использованы технологии дистанционного анализа на углеводороды посредством использования космических снимков.

В настоящей работе предлагается на региональной стадии исследований по поиску углеводородов технология CRS (complex remote sensing – комплексный дистанционный анализ), разработанная в российской геологической компании «ОЗГЕО», имеющая неоспоримые преимущества по сравнению с технологиями, разработанными как в России, так и за рубежом.

Например, согласно ГА «Иннотер», деятельность современного нефтегазового комплекса в России требует широкого применения геопространственной информации и географических информационных систем (ГИС) уже на стадии

¹ Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Оренбургской области на 15.12.2022 г. Подготовлена ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2022 г. № 049-00018-22-01. URL: <http://atlaspacket.vsegei.ru/#2717c267d8115ae37> (07.04.2023).

² Применение космических снимков в нефтегазовой отрасли. Иннотер. URL: <https://innoter.com/articles/primeneniye-kosmicheskikh-snimkov-v-neftegazovoy-otrasli/> (07.04.2023).

поисков³. Космические снимки применяются на стадии изучения геологического строения и перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов, с их помощью осуществляется проведение комплексного анализа всех имеющихся дистанционных, ландшафтных и геолого-геофизических данных. Для изучения геологических объектов на космических снимках проводится их трансформирование и монтаж, создание цветowych композиций, фильтрация, автоматическая классификация, линеаментный анализ (выделение линеаментов в визуальном и автоматическом режиме, построение роз-диаграмм и схем плотности линеаментов). Проще говоря, анализ перспектив нефтегазоносности связан только с линеаментным и ландшафтным анализами.

Аналогично оценивают региональные перспективы нефтегазоносности и другие российские компании, например авторы [1].

Англо-американская компания ERDAS Imagine разработала пакет обработки космических изображений для прогноза на нефть и газ на основе линеаментного анализа и цифровых моделей рельефа на основе использования программного модуля LESSA для пакета ERDAS Imagine [2]. Модуль LESSA (lineament extraction and stripes statistic analysis) используется в геологическом и сейсмологическом районировании для изучения линеаментов [3].

Американская компания L3Harris Geospatial разработала технологию ENVI – выделение эталонных объектов по широкому спектру полезных ископаемых, в том числе углеводородов, на основе формирования библиотеки эталонов нефти и газа. Сравнительный анализ спектральных снимков с эталонными данными библиотеки для выделения аналогичных объектов является основой технологии [4].

Основной проблемой всех перечисленных технологий, за исключением CRS, является невозможность выявления прямых признаков ископаемых углеводородов. Они осуществляют линеаментный, ландшафтный анализы и проводят сопоставление спектральных портретов выявленных месторождений нефти и газа с изучаемыми территориями. Практический результат этих ис-

следований для прогнозирования месторождений нефти и газа настолько малозначим, что ведущие нефтяники России давно потеряли всякий интерес к ним.

Отличие используемой авторами технологии CRS заключается в том, что на дневной поверхности при анализе космических снимков выявляются спектральные аномалии углеводородов, образующиеся от миграции флюидов углеводородов от залежи до дневной поверхности. За счет длительности процесса миграции в десятки, а иногда сотни млн лет, удается обнаружить на поверхности следы залежей на глубинах до 5–6 тыс. м. При этом мерзлота или мощные залежи солей хотя и уменьшают процесс миграции нефтегазовых флюидов, но полностью не экранируют нефтегазовые залежи.

1. Колганская толща

Главным объектом исследования являются верхнедевонские терригенные отложения колганской толщи фран-фаменского возраста. С отложениями колганской толщи (пласты группы D3k1) связано около 40 % объема разведанных запасов нефти Восточно-Оренбургского нефтегазоносного района. Толща сложена серией мощных (до 100 м) пачек терригенных пород внутри карбонатного массива верхнефранско-нижнефаменского возраста. Ареал развития терригенных отложений колганской толщи с площадью не менее 15 тыс. км² простирается к северо-западу от Оренбургского вала на расстояние более 100 км [5]. В колганских резервуарах открыт ряд мелких и средних месторождений нефти Оренбургской области: Филатовское, Вахитовское, Донецко-Сыртовское, Дачно-Репинское, Царичанское. Вместе с тем толща остается перспективным объектом на поиски нефти на юге региона [6].

Формированию колганской толщи, распространенной на юге Оренбургской области, по видимому, поспособствовал усилившийся снос терригенного материала с суши, существовавшей в районе современного Соль-Илецкого свода и Предуральского прогиба [7]. Ряд авторов⁴ ограничивают распространение колганской толщи в пределах Колгано-Борисовской впадины на гра-

³ Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Оренбургской области на 15.03.2021 г. СПб.: ВСЕГЕИ, 2021. URL: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Fast/Files/202104/b1ed3ce2b7dff8142daf36cec9dd3b76.pdf> (дата обращения: 12.09.2022).

⁴ Ефремов В.А., Пуцаев А.М. Отчет Уральской партии о геологическом доизучении масштаба 1:200000 и подготовке к изданию Госгеокарты-200 листов М-40-І, ІІ в 1994–2000. Нежинка; 2001. Росгеолфонд инв. № 9341.

нице Восточно-Оренбургского сводового поднятия и Бузулукской впадины (рис. 1).

Однако замыкание распространения колганской толщи в северо-западном направлении нами понимается не как выклинивание терригенных отложений, а как переход отложений прибрежно-

морских фаций в терригенные отложения речных палеодолин или в терригенные отложения Южно-Оренбургской системы грабенных.

Геологический разрез по линии А – А1 приведен на рис. 2. Местоположение разреза показано на рис. 1 красной линией.

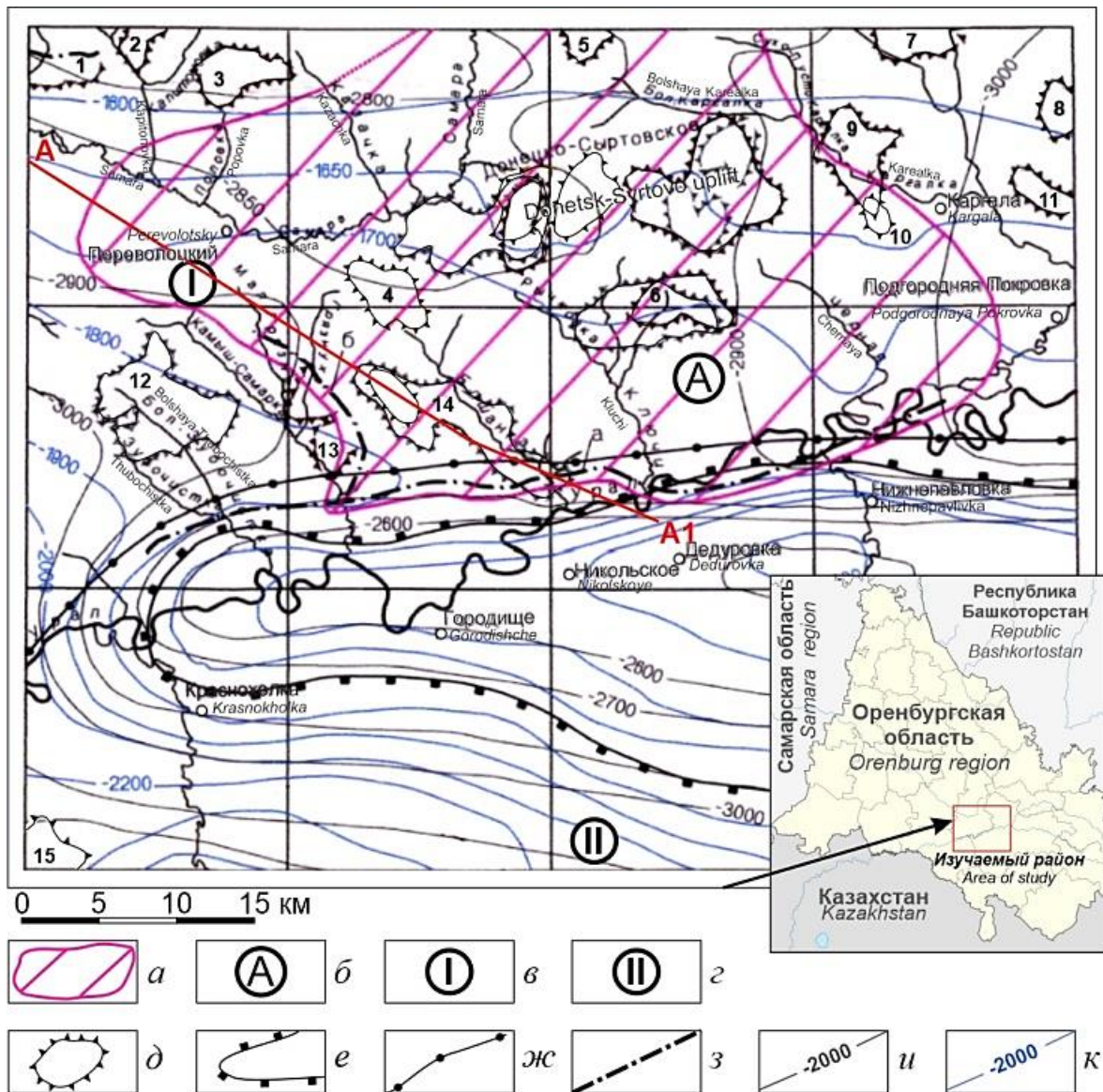


Рис. 1. Площадь распространения колганской толщи

на тектонической схеме подсолевого комплекса в пределах изучаемого района:

- а – площадь распространения колганской толщи (D₃kl) в Колгано-Борисовской впадине; б – юго-восточный склон Волго-Уральской антеклизы;
- в – Восточно-Оренбургское сводовое поднятие; г – Соль-Илецкий свод; д – локальные поднятия: 1 – Капитоновское, 2 – Южно-Радовское, 3 – Восточно-Радовское, 4 – Западно-Самаркинское, 5 – Кариновское, 6 – Южно-Сыртовское, 7 – Архангеловское, 8 – Лаптевское, 9 – Струковское, 10 – Шуваловское, 11 – Южно-Лаптевское, 12 – Садовое, 13 – Приразломное, 14 – Татищевское, 15 – Южно-Кардаилловское;
- е – Оренбургский вал; ж – граница Восточно-Оренбургского сводового поднятия и Соль-Илецкого свода по кровле артинского яруса;
- з – разломы: а – Оренбургский, б – Переволоцкий; и – изогипсы кровли турнейского яруса; к – изогипсы кровли артинского яруса

Figure 1. The area of distribution of the Kolgan strata on the tectonic scheme of the subsalt complex within the studied area:

- a – the area of distribution of the Kolgan strata (D₃kl) in the Kolgan-Borisov depression; б – the southeastern slope of the Volga-Ural anteclise;
- в – the East Orenburg arch uplift; г – the Salt-Iletsy arch; д – local uplifts: 1 – Kapitonskoye, 2 – Yuzhno-Radovskoye, 3 – Vostochno-Radovskoye, 4 – Zapadno-Samarkinskoye, 5 – Karinovskoye, 6 – Yuzhno-Syrtovskeye, 7 – Archangelovskoye, 8 – Laptevskoye, 9 – Strukovskoye, 10 – Shuvalovskoye, 11 – Yuzhno-Laptevskoye, 12 – Sadovoye, 13 – Prirazlomnoye, 14 – Tatischchevskoye, 15 – Yuzhno-Kardailovskoye;
- е – Orenburg shaft; ж – border of the East Orenburg arch rise and the Sol-Ilets arch along the roof of the Artinsky tier;
- з – faults: а – Orenburg, б – Perevolotsky; и – isohypses of the roof of the Tournaisky tier; к – isohypses of the roof of the Artinsky tier

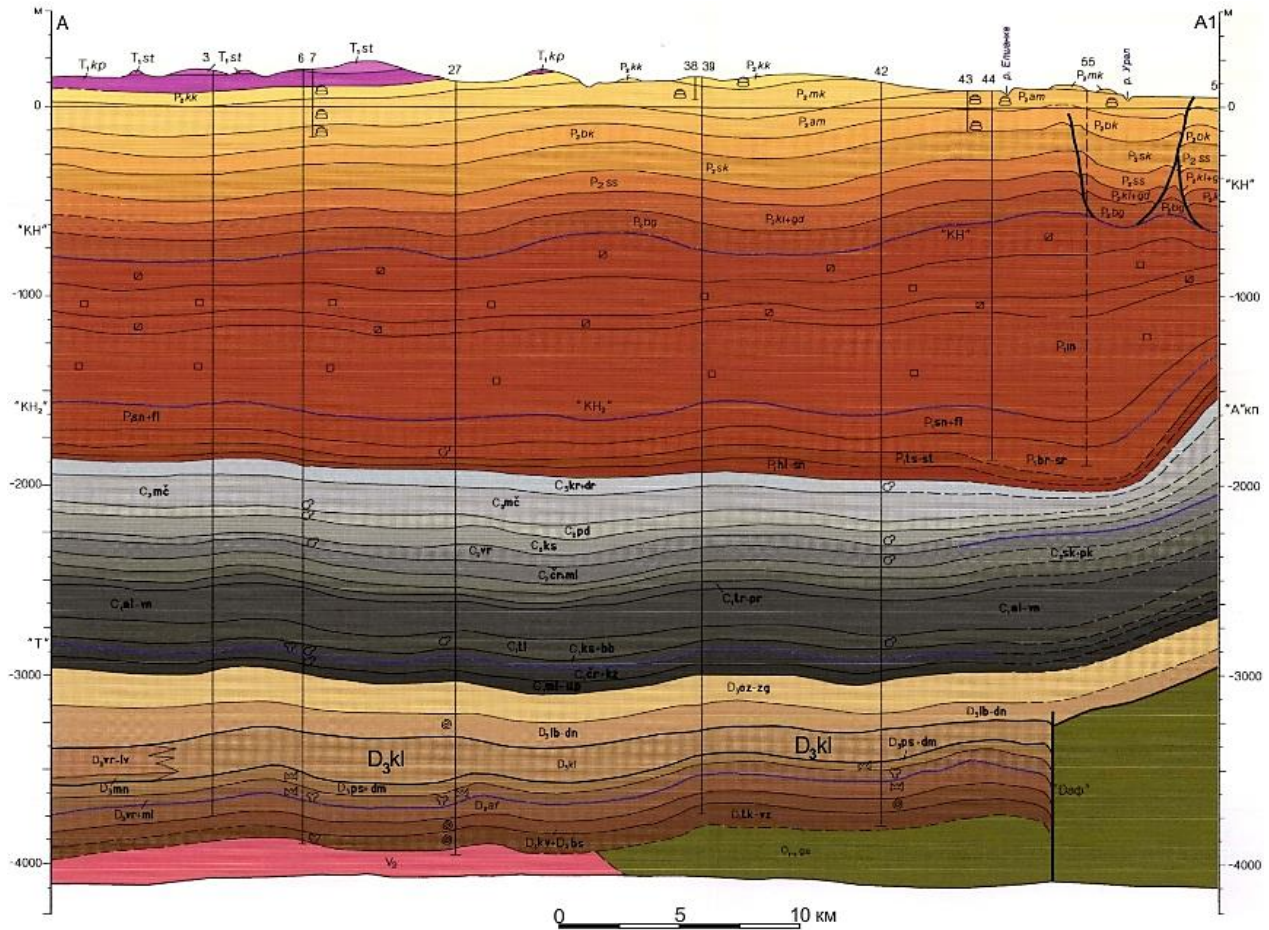


Рис. 2. Геологический разрез по линии А – А1 в долине р. Самары: колганская толща – D₃kl выклинивается у Соль-Илецкого свода (А1) и погружается в направлении к Бузулукской впадине (А)

Figure 2. Geological section along the A – A1 line in the Samara River valley:

The Kolgan strata – D₃kl wedges out at the Sol-Iletsks arch (A1) and sinks in the direction of the Buzuluk depression (A)

На представленном разрезе наблюдается увеличение мощности Колганской толщи (D₃kl) с юго-востока (100 м) на северо-запад (200 м), причем отсутствуют скважинные данные по фациальной смене отложений на крайнем северо-западном направлении разреза.

Поскольку в стратиграфическом разрезе ниже высокопродуктивной Колганской толщи верхнего девона (D₃kl) нефтематеринские породы отсутствуют, предполагается, что миграция нефти на рассматриваемую территорию осуществлялась по пористым терригенным коллекторам нижнего, среднего и верхнего девона. Общее направление миграции от глубинных частей Бузулукской впадины на Восточно-Оренбургское сводовое поднятие и Соль-Илецкий свод.

2. Дистанционные исследования

При проведении дистанционных исследований на площади в верховьях р. Самары использовалась технология комплексного дистанционного анализа (CRS), разработанная в компании «ОЗГЕО». Основой технологии CRS для поиска месторождений нефти и газа является проведение ряда отдельных независимых анализов геолого-геофизических материалов, данных космической съемки и сопоставление их между собой. Составными частями метода: автоматизированный анализ теплового поля, экспертное дешифрирование тектоники в тепловом диапазоне, литологическое дешифрирование вещественных комплексов в видимом диапазоне, специализированный анализ на выявление спектральных

аномалий углеводородов в видимом, среднем и ближнем спектральных диапазонах. Искомые спектральные аномалии могут отражать микроизменения растительного покрова либо микроизменения цветности почв или горных пород над залежами углеводородов. Сопоставление получаемых результатов с результатами предыдущих геолого-геофизических исследований позволяет определять искомые объекты – перспективные площади для открытия залежей нефти и газа.

Технология дистанционного поиска месторождений углеводородов создана специалистами компании «ОЗГЕО» в 2002 г., неоднократно модернизировалась и успешно применялась в различных странах (США, Колумбия, Парагвай,

Греция, Ливия, Мали, Иордания, Россия, Казахстан, Узбекистан, Афганистан, Китай, КНДР, Индонезия) в рамках тридцати коммерческих проектов и успешно апробирована.

Исследования проводились в различных климатических зонах: тундре, лесотундре, в зонах тайги на севере России, степей, прерий Парагвая, в джунглях Колумбии и Индонезии, в пустынях Техаса, Мали, Ливии, Иордании, Узбекистана и Казахстана. Эффективно применение технологии CRS и в регионах с обильным растительным покровом, характерным для Оренбургской области. Здесь в качестве эталонов при дистанционных исследованиях могут использоваться ближайшие разведанные и эксплуатирующиеся месторождения нефти и газа.

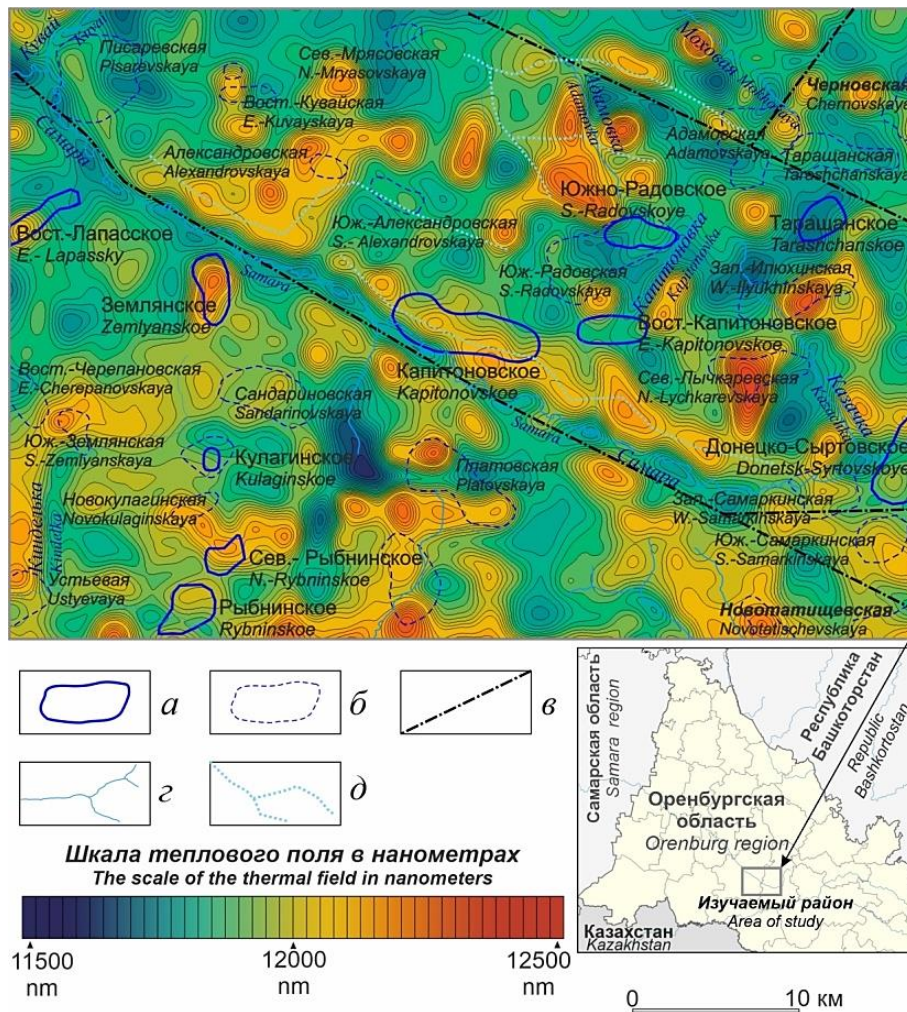


Рис. 3. Актуализация тектоники на основе анализа теплового поля:
 а – контуры выявленных месторождений нефти и газа и из названия; б – контуры выявленных структур по сейсмическим данным;
 в – предполагаемые разрывные нарушения; г – современная речная сеть; д – предполагаемые палеодолины
Figure 3. Actualization of tectonics based on the analysis of the thermal field:
 а – contours of identified oil and gas fields and from the name; б – contours of identified structures based on seismic data;
 в – suspected discontinuous faults; г – modern river network; д – suspected paleodolines

Для анализа теплового поля использовался 11 канал космического снимка Landsat-8. Этот канал регистрирует самое длинное инфракрасное излучение в диапазоне 11 500–12 500 нм, самое глубинное излучение Земли, которое может регистрировать TIRS (Thermal InfraRed Sensor) установленный на указанном спутнике. Разломы на границах блоков разделяют, как правило, разные тепловые поля, а сами разломы из-за насыщения влагой часто имеют пониженное линейное тепловое поле. Для наглядности тепловое поле переведено в вид тепловой карты по технологии CRS (рис. 3). Анализ теплового поля изучаемой площади позволил выявить несколько разломов, обуславливающих блоковое строение территории. Наиболее уверенно выделяется разлом северо-западного простирания по долине р. Самары. Его северо-восточный борт, вероятно, приподнят, вследствие чего на этом борту наблюдается положительная тепловая аномалия.

Месторождение Капитоновское, выявленное вблизи разлома, возможно, имеет приразломный тип нефтегазовой залежи. Другим примером может являться месторождение Землянское.

Дешифрирование геологических комплексов, выходящих на дневную поверхность в видимых спектральных диапазонах (450–850 нм) непродуктивно, поскольку до 90 % поверхности закрыто результатами антропогенной деятельности (сельскохозяйственные угодья, менее промышленные и жилые зоны, дороги и транспортные коммуникации).

Более информативно проведение специализированного анализа по *выделению спектральных аномалий* углеводородов на дневной поверхности. По технологии CRS специализированный анализ по выявлению спектральных аномалий углеводородов проводится в видимом, ближнем и среднем (450–2300 нм) диапазонах. Используется математический аппарат для частотно-волновой фильтрации отдельных диапазонов. При этом анализе фиксируются микроизменения растительного покрова, микроизменения цветности почв или горных пород над залежами углеводородов. Материалы космической съемки земной поверхности не позволяют при исследованиях классифицировать перспективные объекты по преобладанию тех или иных углеводородов (нефть, газ, конденсат). Результатом анализа являются общие углеводородные аномалии над перспективными объектами, поэтому в качестве эталон-

ных объектов могут быть выбраны углеводородные месторождения вне зависимости от их локализации в том или ином нефтегазоносном комплексе. По существу, фиксируется накопление в поверхностном слое флюидов углеводородов, достигших дневной поверхности.

Следует иметь в виду ряд *отрицательных факторов* для проведения анализа. Во-первых, это наличие в разрезе нижнепермских отложений иренского горизонта ($P_1 in$) мощного пласта каменной соли (от 800 до 120 м). Это пласт препятствует свободной миграции флюидов углеводородов от залежей до дневной поверхности, в связи с чем интенсивность аномалий часто уменьшена на порядок (по интенсивности), а над некоторыми месторождениями аномалии практически отсутствуют. Во-вторых, это антропогенная деятельность, связанная с земледелием, которая также является осложняющим фактором, однако при проведении анализа по растительному покрову результат сглажен. Над нетронутыми травами оврагов и речных склонов отрицательные факторы сильнее, а над растениями сельхозугодий – слабее за счет взрыхления почв [8; 9].

3. Результаты

Результаты проведенного анализа отражены на рис. 4. При сопоставлении спектральных аномалий, выделенных в разных диапазонах, удалось выявить их над известными месторождениями: Капитоновское, Южно-Радовское, Донецко-Сыртовское, Землянское, Восточно-Лапасское, Кулагинское, Северо-Рыбнинское и Рыбнинское. Подтверждена перспективность ряда структур, ранее выявленных при сейсмических работах, что говорит о наличии в них углеводородов. К этим структурам относятся Писаревская, Восточно-Кувайская, Северо-Мрясовская, Адамовская, Таращанская, Западно-Илюхинская, Александровская, Южно-Александровская, Сандариновская, Северо-Южно-Платовская.

Кроме того, на севере изучаемой площади в бассейнах современных рек Моховой и Адамовки выделены лентообразные аномалии, интерпретируемые как палеодолины верхнего девона, выполненные терригенными отложениями, пористые коллекторы которых использовались при миграции углеводородов. Не исключено, что эти литологически экранированные залежи могут представлять новый тип залежей в данном районе.

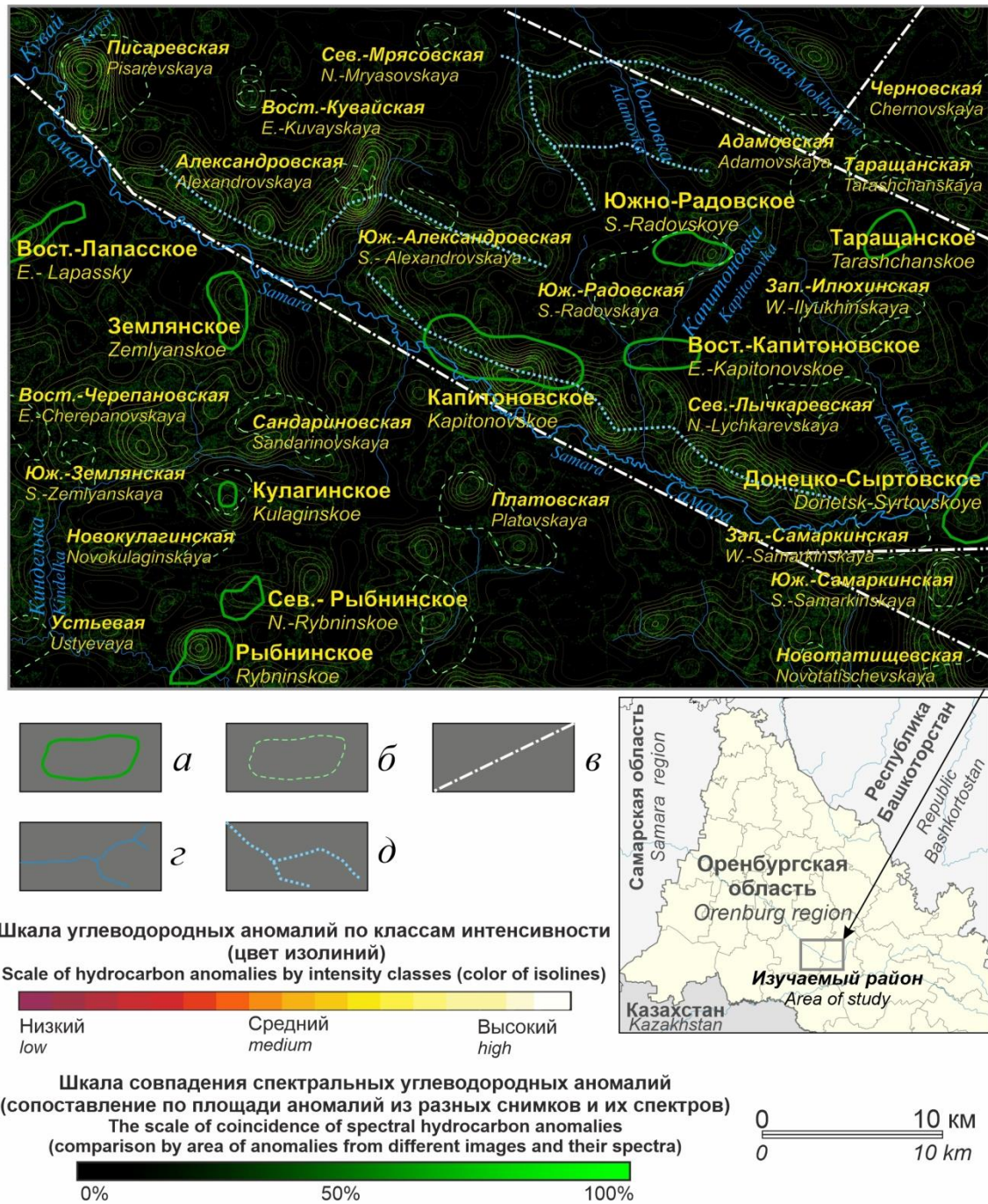


Рис. 4. Сопоставление спектральных аномалий углеводородов:

а – контуры выявленных месторождений нефти и газа и из названия; б – контуры выявленных структур по сейсмическим данным; в – предполагаемые разрывные нарушения; г – современная речная сеть; д – предполагаемые палеодолины

Figure 4. Comparison of spectral anomalies of hydrocarbons:

а – contours of identified oil and gas fields and from the name; б – contours of identified structures according to seismic data; в – suspected discontinuous faults; г – modern river network; д – suspected paleodolines

Менее убедительно, но возможно, наличие подобных залежей на изучаемом участке в правом борту р. Самары. Выделенный разлом, вероятно, неоднократно активизировался и мог

служить причиной заложения палеоруслу Самары в верхнедевонское время. Во всяком случае наличие здесь обозначенных нами терригенных коллекторов вполне возможно.

Заключение

Проведенные исследования позволили выявить на дневной поверхности аномалии углеводородов, образовавшиеся за счет миграции флюидов углеводородов от углеводородных залежей на глубине до 4000 м. Часть этих аномалий связана с палеоруслурами Колганской толщи, другая – соответствует палеодельтам и другими структурным ловушкам. Безусловно, хотя приведенный дистанционный метод весьма информативен, при геологическом анализе он должен применяться в комплексе с другими, в частности сейсмическими, методами.

Проведенные детальные исследования по технологии CRS в 2021 г. на прилегающем с севера лицензионном участке «Степное» площадью 460 км² подтвердили алгоритмы определения углеводородных залежей. В ходе дистанционного анализа выделены как спектральные аномалии, связанные с антиклинальными, структурными, рифовыми и литологическими залежами известных месторождений, так и лентообразные залежи, идентифицируемые как палеоруслы, палеодельты и прибрежные отложения колганской толщи верхнего девона.

В целом, по данным «Газпромнефти», нефтяные месторождения Капитоновское (на рассматриваемой территории) и Царичанское, а также Филатовское (на прилегающей с севера территории) являются самыми продуктивными по добыче нефти.

Список литературы

1. Миловский Г.А., Малышев Н.А., Бородулин А.А., Ишмухаметова В.Т., Орлянкин В.Н. Прогнозирование месторождений углеводородов в Чукотско-Камчатском регионе на основе обработки космических снимков и геофизических данных // Исследование Земли из космоса. 2015. № 5. С. 62–72.

2. Зверев А.Т., Зверев А.В., Салимон Э.А. Прогноз нефтегазовых месторождений на основе линеаментного анализа космоснимков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 3. С. 337–345. <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-3-337-345>

3. Позина Я. Модуль анализа текстуры и линеаментов – LESSA. Методики и технологии дистанционного зондирования Земли с целью оценки параметров тектонических процессов // Pandia. <https://pandia.org/text/80/194/16440-4.php> (дата обращения: 12.09.2022).

4. Колесникова О.Н. Использование программного комплекса ENVI для обработки данных дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2009. № 1. С. 38–41.

5. Никитин Ю.И., Рихтер О.В., Вилесов А.П., Махмудова Р.Х. Структура и условия формирования колганской толщи на юге Оренбургской области // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2014. № 9 (2). С. 1–12.

6. Баранов В.К., Галимов А.Г., Донцкевич И.А., Дубинин В.С., Жуков И.М., Кирсанов М.К., Коврижкин В.С., Козлов Н.Ф., Кузнецов В.И., Кутеев Ю.М., Леонов Г.В., Ляпустина И.Н., Макарова С.П., Малиновский И.Н., Пантелеев А.С., Пелешенко А.С., Постоевко П.И., Терентьев В.Д., Фомина Г.В., Хоментовская О.А. Геологическое строение и нефтегазонасыщенность Оренбургской области / под ред. Н.Ф. Козлова, А.С. Пантелеева. Оренбург: Оренбургское книжное издательство, 1997. 272 с.

7. Шибина Т.Д., Гмид Л.П., Танинская Н.В., Никитин Ю.И. Литология и прогноз коллекторов в колганской толще Вахитовского месторождения Кичкасской площади юга Оренбургской области // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. Т. 2. С. 1–22.

8. Абрамов В.Ю., Власов П.Н. О распространенности углеводородов в кристаллическом фундаменте Татарского свода // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2013. № 4. С. 21–26.

9. Абрамов В.Ю., Данилюк А.В. Литологические особенности баженновской свиты Надым-Пурской нефтегазонасыщенной области по данным люминесцентного анализа // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2015. № 4. С. 86–93.

References

1. Milovsky GA, Malyshev NA, Boro-dulin AA, Ishmukhametova VT, Orlyankin V.N. Forecasting of hydrocarbon deposits in the Chukotka-Kamchatka region based on the processing of satellite images and geophysical data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015;(5):62–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S020596141505005X>

2. Zverev AT, Zverev AV, Salimon EA. Forecast of oil and gas deposits with the use of lineament analysis of space images data. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2018;62(3):337–345. (In Russ.) <https://doi.org/10.30533/0536-101X-2018-62-3-337-345>

3. Posina Ya. Texture and lineament analysis module – LESSA. Methods and technologies of remote sensing of the Earth in order to assess the parameters of tectonic processes. *Pandia*. Available from: <https://pandia.org/text/80/194/16440-4.php> (accessed: 12.09.2022).

4. Kolesnikova ON. Using the ENVI software package for processing Earth remote sensing data. *Geomatics*. 2009;(1):38–41. (In Russ.)

5. Nikitin YuI, Rikhter OV, Vilesov AP, Makhmudova RH. Structure and conditions of formation of the Kolganian suite on the south of the Orenburg region. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2014;9(2):1–12.

6. Baranov VK, Galimov AG, Dontskovich IA, Dubinin VS, Zhukov IM, Kirsanov MK, Kovrizhkin VS, Kozlov NF, Kuznetsov VI, Kuteev YuM, Leonov GV, Lyapustina IN, Makarova SP, Malinovsky IN, Panteleev AS, Peleshenko AS, Postoenko PI, Terentyev VD, Fomina GV, Khomentovskaya OA. In: Kozlov NF, Panteleev AS. (eds.) *Geological Structure and Oil and Gas*

Potential of the Orenburg Region. Orenburg: Orenburgskoe Knizhnoe Izdatel'stvo Publ.; 1997. (In Russ.)

7. Shibina TD, Gmid LP, Taninskaya NV, Nikitin YuI. Lithology and forecast of reservoirs in the Kolgan strata of the Vakhitovskiy field of the Kichkasskaya area of the south of the Orenburg region. *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*. 2007;2:1–22. (In Russ.)

8. Abramov VYu, Vlasov PN. Area of oli in crystallics basement of Tatarskiy arc. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2013;(4):21–26. (In Russ.)

9. Abramov VYu, Daniluk AV. Lithological features of the Bazhenov formation of Nadym-Purskaya oil and gas field according to the data of fluorescent analysis. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2015;(4):86–93. (In Russ.)

Сведения об авторах

Пичугин Сергей Валентинович, главный геолог, геологоразведочная компания «ОЗГЕО», Российская Федерация, 119002, Москва, Староконоушенный пер., д. 33; ORCID: 0009-0002-4756-3856; svpichugin2103@mail.ru

Котельникова Елена Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-8909-8953, Scopus Author ID: 57205571168, eLIBRARY SPIN-код: 8173-9810; kotelnikova-em@rudn.ru

Усова Валентина Михайловна, старший преподаватель, департамент недропользования и нефтегазового дела, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-0023-5913, Scopus Author ID: 57205576129, eLIBRARY SPIN-код: 1276-3570; usova-vm@rudn.ru

Усов Антон Андреевич, магистр, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. МиклухоМаклая, д. 6; ORCID: 0009-0009-9691-8126; 1032020521@rudn.ru

About the authors

Sergey V. Pichugin, chief geologist, Geological Exploration Company “OZGEO”, 33 Starokonyushennyi Pereulok, Moscow, 119002, Russian Federation; ORCID: 0009-0002-4756-3856; svpichugin2103@mail.ru

Elena M. Kotelnikova, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Subsoil Use and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8909-8953, Scopus Author ID: 57205571168, eLIBRARY SPIN-code: 8173-9810; kotelnikova-em@rudn.ru

Valentina M. Usova, senior lecturer, Department of Geology, Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0023-5913, Scopus Author ID: 57205576129, eLIBRARY SPIN-code: 1276-3570; usova-vm@rudn.ru

Anton A. Usov, master's degree, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-9691-8126; 1032020521@rudn.ru