



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

2022 Том 23 № 3

DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-3

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

Научный журнал

Издается с 2000 г.

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

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

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Мисра Арун – профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

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

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

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

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

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

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

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

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

Спенсер В. Дэвид – профессор, Университет штата Пенсильвания, 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

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

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

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

Периодичность: 4 выпуска в год (ежеквартально).

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

Языки: русский, английский.

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

Цель и тематика

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

Цели журнала:

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

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

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

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

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

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

Адрес редакционной коллегии журнала
«Вестник 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 23.12.2022. Выход в свет 30.12.2022. Формат 60×84/8.

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

Усл. печ. л. 9,30. Тираж 500 экз. Заказ № 818. Цена свободная.

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

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 955-08-74; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2022 Volume 23 Number 3

DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-3

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

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia

Editor-in-Chief

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

Associate Editor-in-Chief

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

Assistant to the Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Arun Misra – Professor, McGill University, Montreal, Canada

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Publication frequency: quarterly.

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

Languages: Russian, English.

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

Aims and Scope

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

The aims of the journal:

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

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

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

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

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

Address of the editorial board:

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

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

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

Printing run 500 copies. Open price.

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

Printed at RUDN Publishing House:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Разуваев А.В., Редько И.Я., Краснолудский Н.В., Костин Д.А. Актуальность применения возобновляемых топлив в энергетических комплексах	191
Сидоров И.Г. Минимаксный адаптивный алгоритм фильтрации нелинейных систем рядами Вольтерра второго порядка	198
Кривошапко С.Н. Алгебраические судовые поверхности с каркасом из трех плоских кривых в координатных плоскостях	207
Белоусов Ю.В., Кириловский В.В., Рекач Ф.В. Исследование влияния степени соприкосновения поверхностей качения на контактные напряжения в шариковых радиальных подшипниках	213
Страхов П.Н., Маркелова А.А. Вероятностная оценка проницаемости отложений верхней части Тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района	224
Сунь Х., Хуан Ц., Воробьев К.А. Сравнение инновационных технологий добычи газовых гидратов в Китае и Японии	232
Mendoza Alava J.O., Zambrano Xavier Horacioa V., Mendoza Cedeño J.J., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Phenomenological model of the intensity, duration and frequency of precipitation patterns for the Portoviejo river basin, Ecuador (Феноменологическая модель интенсивности, продолжительности и частоты выпадения осадков для бассейна реки Портовьехо, Эквадор)	246
Усова В.М. Закономерности и геоисторические предпосылки нефтегазовой специализации рифтогенных осадочных бассейнов Африки	254

CONTENTS

Razuvaev A.V., Redko I.Ya., Krasnoludskiy N.V., Kostin D.A. The relevance of using the renewable fuels for power grids	191
Sidorov I.G. Minimax adaptive filtering algorithm nonlinear systems with Volterra series of the second order	198
Krivoshapko S.N. Algebraic ship hull surfaces with a main frame from three plane curves in coordinate planes	207
Belousov Yu.V., Kirilovskiy V.V., Rekach F.V. Investigation of the influence of the degree of contact of rolling surfaces on contact stresses in ball radial bearings	213
Strakhov P.N., Markelova A.A. Probabilistic assessment of the permeability of the deposits of the upper part of the Tyumen suite of the Shaim oil and gas region	224
Sun H., Huang Q., Vorobyev K.A. Comparison of innovative gas hydrate extraction technologies in China and Japan	232
Mendoza Alava J.O., Zambrano Xavier Horacio V., Mendoza Cedeño J.J., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Phenomenological model of the intensity, duration and frequency of precipitation patterns for the Portoviejo river basin, Ecuador	246
Usova V.M. Regularities and geohistorical prerequisites of oil and gas specialization of rift sedimentary basins of Africa	254



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-191-197
UDC 620.97

Research article / Научная статья

The relevance of using the renewable fuels for power grids

Alexander V. Razuvaev^a , Ivan Ya. Redko^b ✉, Nikolay V. Krasnoludskiy^a, Dmitry A. Kostin^a

^aBalakovo Engineering and Technology Institute – branch of the National Research Nuclear University MEPHI,
Balakovo, Russian Federation

^bSouth Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation
✉ redko_ia@mail.ru

Article history

Received: May 17, 2022

Revised: September 5, 2022

Accepted: September 10, 2022

Keywords:

cogeneration power plants, renewable fuels, firewood, characteristics, energy technology complex, steam piston machine

Abstract. The paper presents the analysis and efficiency of using the cogeneration power plants and alternative energy sources. The documents on the relevance of introducing the energy-efficient measures in the economies of various countries are given. The prospects of using the alternative and renewable fuels considering the effectiveness of their use in various power systems and grids are well substantiated. Such measures contribute, on the one hand, to saving the hydrocarbon fuels extracted from the ground and to extending their use, and, on the other hand, to the development and application of the alternative power grids with the use of the renewable fuels. Firewood can serve as such a fuel. The characteristics of the firewood in the corresponding tables are described. It provides the opportunity for evaluating the efficiency of the woodfired power plant depending on the type of the firewood and the territory of growing the firewood at the development stage. Moreover, the characteristics of the firewood make it possible to estimate its necessary amount and the territory for storing and harvesting. Based on the obtained data, the authors conclude that it is necessary to develop and establish the power plants based on the reciprocating steam engines for various small and medium-sized enterprises. Design proposals for the power plant based on the reciprocating steam engine are briefly present-ed and the economic effect of its use on site is estimated.

For citation

Razuvaev AV, Redko IYa, Krasnoludskiy NV, Kostin DA. The relevance of using the renewable fuels for power grids. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):191–197. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-191-197>

Актуальность применения возобновляемых топлив в энергетических комплексах

А.В. Разуваев^a , И.Я. Редько^b ✉, Н.В. Краснолудский^a, Д.А. Костин^a

^aБалаковский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Балаково, Российская Федерация

^bЮжно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация
✉ redko_ia@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 мая 2022 г.

Доработана: 5 сентября 2022 г.

Принята к публикации: 10 сентября 2022 г.

Аннотация. Представлен анализ и эффективность применения когенерационных энергоустановок и альтернативных источников электроэнергии. Отмечены документы по актуальности внедрения энергоэффективных мероприятий в экономики различных стран. Обоснована



Ключевые слова:

когенерационные энергоустановки, возобновляемые виды топлива, дрова, характеристики, энерготехнологический комплекс, паровая поршневая машина

перспективность применения альтернативных и возобновляемых видов топлива с учетом эффективности их применения в различных энергетических системах и комплексах. Такие мероприятия способствуют, с одной стороны, экономии добываемых в земле углеводородных топлив и продлению сроков их использования, а с другой стороны – развитию и применению альтернативных энерготехнологических комплексов с использованием в них возобновляемого топлива. Подобным топливом могут служить дрова. Приведены характеристики дров в соответствующих таблицах, что дает возможность уже на стадии проработки оценить эффективность применения энергокомплекса на дровах в зависимости от их сорта и территории его возростаия. Кроме того, характеристики дров позволят оценить необходимое их количество и территорию для складирования и заготовки. На основании полученных данных сделан вывод о необходимости разработки и создания энерготехнологических комплексов на базе паровых поршневых машин для различных малых и средних предприятий. Проектные предложения по энерготехнологическому комплексу на базе паровых поршневых машин представлены кратко, оценен экономический эффект по его применению на месте эксплуатации.

Для цитирования

Разуваева А.В., Редько И.Я., Краснолудский Н.В., Костин Д.А. Актуальность применения возобновляемых топлив в энергетических комплексах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 191–197. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-191-197>

Introduction

Nowadays the shortage of energy carriers in Europe indicates that studies in this regard are relevant. On the one hand, the energy resources are saved, on the other, various types of fuels instead of hydrocarbons extracted from the bowels of the earth, are used. The problem of the fuel economy can be solved on the basis of applying the cogeneration system used at various facilities requiring the energy resources, such as electricity and heat.

The document,¹ which states that “the potential of using cogeneration as an energy saving measure is not fully used in the Commonwealth today, is devoted to the issues of cogeneration and its effective application. The promotion of high-efficiency cogeneration based on the demand for useful heat is a priority for the Commonwealth, given the savings of the primary energy sources, the prevention of distribution losses and the reduction of harmful emissions (greenhouse gases) into the atmosphere.” Moreover, the efficient use of the energy produced by cogeneration can also contribute to the continuity of energy supply and has a positive impact on the development of competition in the European Union and member states. Therefore, it is necessary

to take measures to ensure the best use of the potential within the domestic energy market. Besides, it seems interesting, relevant, and appropriate to use the relevant provisions contained in Directive 2003/54/EC and Directive 2001/77/EC of the European Parliament and of the Council of 27 September 2001 on the promotion of electricity generated from the renewable energy sources.

In this case, the issue of using the energy generated from the renewable energy sources is noteworthy. This contributes to the development of the general-purpose heat and power plants based on the reciprocating steam engines [1].

The given plant is powered by steam generated by using the renewable fuels which include firewood from various types of trees, pellets, manure and some other fuels, including gas generator gas. Gas generator gas production technology is also relevant since various types of fuels and materials can be used to produce gas.

1. The relevance of using the renewable fuels

Russian Energy Strategy paper² states that “the growth rate of the global primary energy consumption contained in ES-2035 is expected to be 1.2% per year” and further the paper states that “the emergence of new producers, the growing importance of unconventional hydrocarbon resources

¹ Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC. Available from: <https://base.garant.ru>

² Energy Strategy of Russia for the period till 2035, main provisions (as amended on 07.02.2014).

and the accelerated development of the renewable energy sources lead to the tougher competition in the global energy markets. When studying the prospects for external demand for Russian energy resources formulated in ES-2035, the analysis results of energy strategies of the largest consumers and producers of energy resources aimed at the energy self-sufficiency are also taken into account.” This confirms the relevance of considering and applying unconventional energy resources and accelerated development of renewable energy sources. Such fuels include firewood of different types, pellets, and a number of others.

It is worth considering the parameters of such fuels which include not only energy parameters, e.g., the fuel calorific value, but also the weight and size values. These data should facilitate their application at the specific facilities of power plants.

Such power plants have been previously considered in paper, where the concept [2; 3] of their development has been proposed. Paper describes the energy complex calculated depending on its purpose. Simultaneously, it is necessary to analyse its parameters as the entire energy technology complex, thereby defining its performance specifications. Furthermore, the parameters of the reciprocating steam engine, such as the pressure and temperature of steam, its flow rate and rotor speed are defined.

The horizontal arrangement of the machine, namely double expansion compound steam engine is the most appropriate. The estimating calculations of the main values have been presented. The diameter of the high-pressure cylinder is 310 mm, the diameter of the low-pressure cylinder is 460 mm, while the steam pressure required for the operation is 1.2 MPa (12 kg/cm²) with a temperature of 573 K (300 °C), its consumption is 1887 kg/hour, the number of revolutions is 2.66 s⁻¹ (160 rpm) [3].

A steam engine rotates a generator through a manual transmission to generate the electric current. The generator BG-160M-4 by the Baranchinsky Electro-mechanical Plant was selected from a catalogue. The specifications of the generator are as follows: the rated power is 160 kW, the rated rotor speed is 25 s⁻¹ (1500 rpm), the stator current is 289 A, the efficiency is 91.6%, the transmission ratio is 9.4.

According to the preliminary design study of the reciprocating steam engine, its dimensions are 4500×4200×1000 mm, and necessary auxiliary power equipment and components are selected from the

commercially available ones. A typical scheme of the power plant is shown in Figure 1.

Besides, the economic efficiency of its application has been analysed and shown. When calculating the economic efficiency of the power plant aimed at increasing the validity of the results obtained, the most common option was adopted as a fuel – maple firewood with a calorific value of 1600 kcal/dm³ and a specific gravity of 0.65 kg/dm³.

When determining the cost of the power plant, we used the publicly available data, while the cost of the reciprocating steam engine was defined based on the expert knowledge by comparing it with the cost of producing the equipment similar in design. Moreover, we took into consideration the cost of the equipment installation and commissioning. The total amount of capital expenditures was about 16 million rubles.

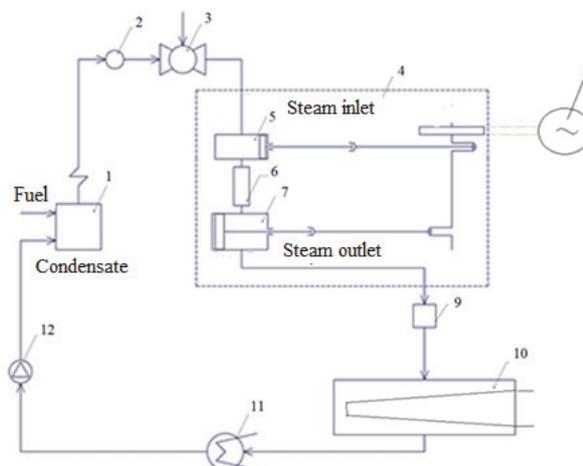


Figure 1. A typical scheme of a power plant:

- 1 – a steam boiler; 2 – a steam flow meter;
- 3 – a steam pressure regulator; 4 – a piston steam engine;
- 5 – a high-pressure cylinder; 6 – a receiver; 7 – a low pressure cylinder;
- 8 – a generator; 9 – an oil separator; 10 – a consumer heating system;
- 11 – a condenser; 12 – a condensate pump

The cost-effectiveness analysis was carried out for a period of one month. From the condition of the need to ensure the superheated steam consumption of 1600 kg/h at the boiler efficiency of 88%, the required amount of heat was defined as the sum of the heat for heating water to the boiling point, the heat required for vaporization and the heat for overheating the steam to the required temperature. The final value for ensuring the piston steam engine operation under the design parameters was 1.195 Gcal/hour or 860.4 Gcal/month, which corresponds to the current district heating tariff of 1.376.640 rubles per month.

The current costs of obtaining the same amount of thermal energy during the power plant operation have been estimated by the object of expenditures: the cost of firewood, the cost of the water system condensate flow, the stuffing costs, the maintenance costs, the costs of electricity for own needs (for the water circulation pump operation, for the power supply of the control and lightning system). Besides, we took into account the costs of maintenance consumables and the costs of the required amount of fuel (firewood).

The total cost of operating expenditures was about 656 thousand rubles per month, which gives an economic benefit of about 720 thousand rubles. The pay-back period of the plant is approximately 1.9 years.

The proposed calculation is estimates, and the economic benefit of the presented plant in every particular case will depend on the performance specifications [4; 5] of the facility and its configuration. More detailed information about this is given in [6–8], while in Russian scientific and technical literature [9].

2. Some types of alternative fuels and their parameters

Some types of alternative fuels include firewood and their wastes. These include twigs, bark, off-cuts (wood processing wastes), as well as pellets based on production wastes and sawdust. Pellet fuels have quite good parameters, including transportation and different types of packaging.

Firewood is one of the most traditional and ancient sources of thermal energy.³ According to their characteristics, firewood is one of the most unstable fuels, but it is a renewable source of thermal energy which is the main advantage.

Firewood is recorded according to the following parameters: on the one hand by weight (kilograms and tons), and by volume (cubic meters) on the other [10].

A composition of wood fuel is almost the same for any type and is as follows: up to 60% of cellulose, from 7 to 8% of accompanying hydrocarbons, up to 30% lignin and the rest is from 1 to 3% of minerals. The firewood quantity mass measuring is rarely used, if it is convenient, e.g., when transporting firewood by car. The weight of the car is calculated before and after the firewood delivery to the place of consumption. This measuring also simplifies the calculation of the calorific value of the supplied amount of firewood.

However, the most common way of measuring the amount of firewood is volumetric, which is simple and fast. The results of measurements by such a parameter are easy to check and control. Besides, there are appropriate methods for various types of storage, size of logs, etc.

We should first consider the characteristics and parameters of such type of alternative fuel as firewood. It is necessary to point out their difference in one of the main characteristics, namely the calorific value. In this case, the volumetric and mass calorific values of various firewood are distinguished. Table 1 shows the examples of these values.

Table 1

The volumetric calorific value of firewood		
No	Wood species	Volumetric specific calorific value of firewood, kcal/dm ³
1	Birch	1389–2240
2	Beech	1258–2133
3	Ash	1403–2194
4	Hornbeam	1654–2148
5	Elm	(analogue is field elm)
6	Field elm	1282–2341
7	Maple	1503–2277
8	Oak	1538–2429
9	Larch	1084–2207
10	Pine	1282–2130
11	Alder	1122–1744
12	Spruce	1068–1974
13	Cedar	1312–2237
14	Fir	(analogue is spruce)
15	Aspen	1002–1729
16	Linden	1046–1775
17	Poplar	839–1370
18	Willow	1128–1840

The first group includes birch, beech, ash, hornbeam, elm, field elm, maple, oak, larch

The second group includes pine and alder

The third group includes spruce, cedar, fir, aspen, linden, poplar, willow

The presented characteristics⁴ make it possible to calculate the required volume or weight of the firewood for a certain time of operation or for the processing period by the amount of heat received.

Table 2 provides the firewood characteristics of different varieties of trees, which allow us to obtain the necessary heat data from a specific volume of firewood.

The volumetric calorific value of firewood for the same type of firewood may differ depending on

³ Wood heating. Available from: <http://tehnopost.kiev.ua/drova/13-teplotvornost-drevesiny.html> (accessed: 22.02.2022).

⁴ Wood heating. Available from: <http://tehnopost.kiev.ua/drova/13-teplotvornost-drevesiny.html> (accessed: 22.02.2022).

the region of growth. This is due to the soil water saturation in the area. This factor must be taken into account when harvesting the firewood, i.e., the drier the firewood, the higher the reward, or if the firewood harvesting is carried out in a more arid region, the profit is also bigger. Although this difference is

not great, only 2–5%, but at larger volumes it can affect the economic indicators in general in terms of the harvest volume.⁵

On this basis and from Table 3, it is necessary to take into account the specific weight of firewood depending on moisture.

Table 2

The specific calorific value of wood fuel for different types of wood

No	Wood species	Absolute (higher) calorific value of wood fuel, kcal/kg	Net (lower) mass calorific value of wood fuel, kcal/kg	Net (lower) volumetric calorific value of wood fuel, kcal/dm ³	Wood density, kg/dm ³	Maximum wood density, kg/dm ³
1	Oak	4753	4000	3240	0.810	0.690–1.03
2	Ash	---	---	3000	0.750	0.520–0.95
3	Rowan	---	---	2920	0.730	0.690–0.89
4	Apple tree	---	---	2880	0.720	0.660–0.84
5	Beech	---	---	2720	0.680	0.620–0.82
6	Acacia	---	---	2680	0.670	0.580–0.85
7	Field elm	---	---	2640	0.660	0.560–0.82
8	Larch	---	---	2640	0.660	0.470–0.56
9	Maple	---	---	2600	0.650	0.470–0.56
10	Birch	---	---	2600	0.650	0.510–0.77
11	Pear	---	---	2600	0.650	0.610–0.73
12	Chestnut	---	---	2600	0.650	0.600–0.72
13	Cedar	---	---	2280	0.570	0.560–0.58
14	Pine	---	---	2080	0.520	0.310–0.76
15	Linden	---	---	2040	0.510	0.440–0.80
16	Alder	---	---	2000	0.500	0.470–0.58
17	Aspen	---	---	1880	0.470	0.460–0.55
18	Willow	---	---	1840	0.460	0.490–0.59
19	Spruce	---	---	1800	0.450	0.370–0.75
20	Pussy willow	---	---	1800	0.450	0.420–0.50
21	Hazelnut tree	---	---	1720	0.430	0.420–0.45
22	Fir	---	---	1640	0.410	0.350–0.60
23	Bamboo	---	---	1600	0.400	0.395–0.405
24	Poplar	---	---	1600	0.400	0.390–0.59

Table 3

The specific weight of firewood, kg/m³, depending on the tree species and moisture percentage

No	Wood species	Moisture percentage, %										
		Fresh	100	80	70	60	50	40	30	25	20	15
1	Larch	940	1100	990	930	880	820	770	710	700	690	670
2	Poplar	700	760	690	650	610	570	540	500	480	470	460
3	Beech	960	1110	1000	950	890	830	780	720	710	690	680
4	Field elm	940	1100	1100	930	880	820	770	710	690	680	660
5	Oak	990	1160	1160	990	930	870	820	760	740	720	700
6	Hornbeam	1060	1330	1330	1130	1000	990	930	860	840	830	810
7	European spruce	740	750	750	640	600	560	520	490	470	460	450
8	Walnut tree	910	1000	1000	850	800	750	700	650	630	610	600
9	Linden	760	830	830	710	660	620	580	540	540	530	500
10	Bustard acacia	1030	1330	1330	1190	1060	990	930	860	840	830	810
11	Alder	810	880	880	750	700	660	620	570	560	540	530
12	Maple	870	1160	1160	990	930	870	820	760	740	720	700
13	European ash	960	1150	1150	930	920	860	800	740	730	710	690
14	Siberian fir	680	630	630	540	510	470	440	410	400	390	380
15	Common pine	820	850	850	720	680	640	590	550	540	520	510
16	Caucasian fir	720	730	730	620	580	550	510	480	460	450	440
17	Siberian pine	760	730	730	620	580	550	510	480	460	450	440
18	Birch	870	1050	1050	890	840	790	730	680	670	650	640
19	Aspen	760	830	830	710	660	620	580	540	530	510	500

⁵ Wood heating. Available from: <http://tehnopost.kiev.ua/drova/13-teplotvornost-drevesiny.html> (accessed: 22.02.2022); In the field of biomass processing. Available from: <http://www.bm-biomass.com>

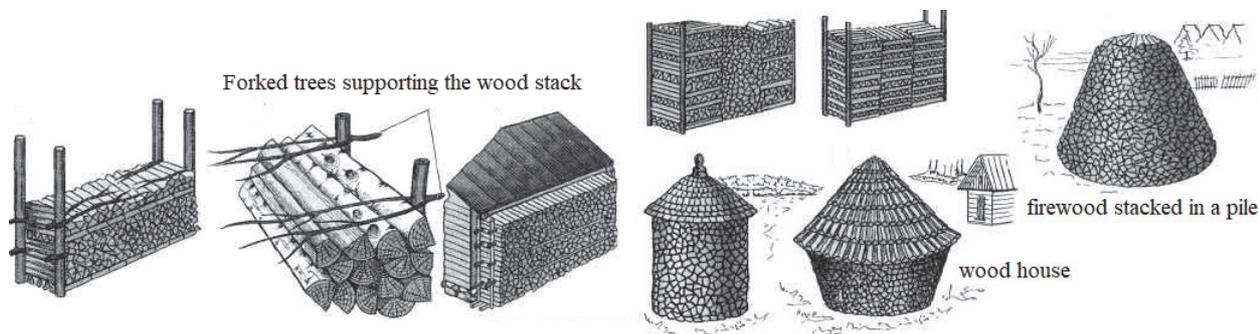


Figure 2. Methods of stacking the firewood

In addition to these data, the ways of storing the firewood for various places of consumption are interesting and presented in Figure 2.

Sawdust as a waste product of woodworking operations is also a fuel, but with worse combustion and storage properties. Nevertheless, sawdust is a good material for pellet production. Sawdust characteristics are presented in Table 4.

Table 4

Weight of the landed dry sawdust depending on the tree species

No	Wood species	Bulk density, kg/m ³	Weight of 1 cube of sawdust, kg
1	Acacia	215	182–225
2	Ash	210	146–266
3	Beech	190	174–230
4	Hornbeam	213	207–223
5	Oak	227	193–288
6	Larch	186	151–186
7	Birch	182	143–216
8	Pine	146	87–213
9	Chestnut	182	168–202
10	Pear	188	164–199

Pellets can be considered as a type of renewable fuel. They are made from compacted sawdust, wastes from wood products, as well as other types and varieties of energy material (production wastes – seed and nuts husk, buckwheat hulls, sunflower husk, tree bark, some types of manure, etc.). The advantages of this type of fuel include the fact that the basis for its production are various renewable combustible materials.⁶

The production itself is uncomplicated and therefore the cost is very competitive in this sector.

⁶ Warmth in the house. Pellet Production. Available from: <https://vse-otoplenie.ru/proizvodstvo-pellet-svoystva-toplivnyh-granul-osobennosti-processa-izgotovleniya-primeneniya-ustanovki> (accessed: 22.02.2022).

The shape of the pellets is close to cylindrical with the height of 5–15 mm and the diameter of 6–8 mm. At the same time, the thermal energy during combustion is about 17.216 kJ/kg and depends on the feedstock used, the ash content is no more than 5%. The density of pellets is 1200–1400 kg/m³, and the bulk density of pellets for storage and transportation is 650 kg/m³. We should mention one more significant advantage, namely the transportation in pellet bags of small weight from 10 to 15 kg and of large weight from 500 to 1200 kg.

Besides, an auger feeds pellets for boiler equipment, which makes it possible to automate the heat production in the boiler, maintaining the necessary parameters of water or steam.

3. Results and discussion

The presented materials provide a justification for the effective and expedient application of the fuel in the form of firewood. Moreover, this type of fuel is renewable due to planting seedlings to compensate felled trees.

The given parameters of different types of trees make it possible to carry out calculations on their application onsite and to evaluate the effectiveness in specific conditions taking into consideration their transportation and storage.

In addition, the main parameters and characteristics of pellets deserving a special attention as a renewable and efficient fuel for the operation of cogeneration plants based on steam piston engines have been presented [11].

Conclusion

It should be noted that it is necessary to develop and effectively use the general-purpose heat and power plants based on the reciprocating steam engines using the renewable fuels in the form of vari-

ous types of firewood and pellets. It would save the limited reserves of hydrocarbon fuel and extend its use in the existing power plants, as well as establish the isolated power plants with low power systems and units.

Finally, further investigation is required regarding the possibility of using other types of alternative and renewable fuels considering the efficiency in various power systems and plants.

References

1. Razuvaev AV, Redko IYa. Energy security of objects. *Young Scientist*. 2015;(23.1):37–39. (In Russ.)
2. Razuvaev AV. Analysis of efficiency of steam-piston power plant. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian University*. 2019;16(9):56–59. (In Russ.)
3. Razuvaev AV, Kobzev RA, Redko IYa. Multi-functional energy-technological complex on the basis of a steam-piston power plant for autonomous facilities of various purposes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1111(1):012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1111/1/012050>
4. Razuvaev AV, Kobzev RA, Redko IYa. Economic efficiency evaluation of applying the general-purpose heat and power plant based on the reciprocating steam engine.

Journal of Physics: Conference Series. 2020;1652:012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1652/1/012023>

5. Redko IYa, Razuvaev AV. The relevance of steam engines use. *Power Engineer*. 2019;(1):27–30. (In Russ.)
6. Krutikhina TA, Razuvaev AV, Kobzev RA. Universal thermal power complex based on a steam piston machine. *Modern Technologies and Automation in Engineering, Management and Education: Proceedings of the International Conference* (vol. 1). Balakovo; 2019. p. 47–51. (In Russ.)
7. Razuvaev AV, Redko IYa. The relevance of the implementation of energy complexes based on a steam piston machine. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2022;(2):60–63. (In Russ.)
8. Zhigalov VA. Application of reciprocating steam engines for direct drive of auxiliary mechanisms of thermal power plants. *Heat Supply News*. 2020;(3):27–30. (In Russ.)
9. Kropachev A. Steam piston technologies in small cogeneration plants. *Akva-Term*. 2017;(6):20–24. (In Russ.)
10. Perederiy S. Steam installations for generating electric and thermal energy. *Lesprom-info*. 2017;(6):126–130. (In Russ.)
11. Zhigalov VA. Power supply of coal producers. Use of thermal power plants with steam piston engines. *Ugol*. 2017;(11):68–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2017-11-68-70>

About the authors

Alexander V. Razuvaev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Automation of Mechanical Engineering, Balakovo Engineering and Technology Institute – branch of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 140 Chapaeva St, Balakovo, 413800, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4593-0653, Scopus Author ID: 57193237174, eLIBRARY SPIN-code: 7336-7031; vipdomik@mail.ru

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

Nikolay V. Krasnoludskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Lifting, Construction and Road Machinery, Balakovo Engineering and Technology Institute – branch of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 140 Chapaeva St, Balakovo, 413800, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9297-4701; krasnoludsky@yandex.ru

Dmitry A. Kostin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Atomic Energy, Balakovo Engineering and Technology Institute – branch of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), 140 Chapaeva St, Balakovo, 413800, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 4733-6124; kos-tin8842@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-198-206
УДК 681.514

Научная статья / Research article

Минимаксный адаптивный алгоритм фильтрации нелинейных систем рядами Вольтерра второго порядка

И.Г. Сидоров

Московский политехнический университет (Московский Политех), Москва, Российская Федерация
✉ igor8i2016@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 27 мая 2022 г.
Доработана: 22 августа 2022 г.
Принята к публикации: 3 сентября 2022 г.

Ключевые слова:

минимаксный, фильтрация, линейный, автокорреляционный, адаптивный, нелинейный, ряд Вольтерра, помеха, градиентный, интенсивность, белый шум

Аннотация. В исследовании решена проблема фильтрации нелинейных систем на основе минимаксного адаптивного алгоритма нелинейных систем рядами Вольтерра второго порядка при условии, что автокорреляционные функции полезного сигнала и помехи известны с некоторыми погрешностями по критерию максимальной среднеквадратической ошибки фильтрации. Анализируется стационарная производительность минимаксного адаптивного фильтра Вольтерра второго порядка с наименьшим средним квадратом (LMS) с постоянным размером шага μ при изменяющейся во времени настройке. Установлена количественная оценка установившейся избыточной среднеквадратичной ошибки (RMSE), в которой хорошо охарактеризован вклад неправильной регулировки градиента и ошибки слежения. Затем задается оптимальный размер шага для изменяющегося во времени минимаксного фильтра Вольтерры второго порядка. Таким образом, можно изучить корреляцию между избыточным MSE и оптимальным размером шага, с одной стороны, и параметрами изменяющейся во времени нелинейной системы, с другой стороны. Получено простое решение с минимальной среднеквадратичной ошибкой для минимаксного фильтра Вольтерра, основанное на предположении, что входной сигнал фильтра является гауссовым. Кроме того, предлагается метод итеративной факторизации для разработки подкласса минимаксных фильтров Вольтерры, который может значительно упростить операции фильтрации. Изучается адаптивный алгоритм для фильтра Вольтерры, а также его средняя сходимость и асимптотическая избыточная среднеквадратичная ошибка. Полезность фильтра Вольтерра демонстрируется его использованием в исследованиях нелинейных дрейфовых колебаний пришвартованных судов, подверженных случайным морским волнам.

Для цитирования

Сидоров И.Г. Минимаксный адаптивный алгоритм фильтрации нелинейных систем рядами Вольтерра второго порядка // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 198–206. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-198-206>



Minimax adaptive filtering algorithm nonlinear systems with Volterra series of the second order

Igor G. Sidorov 

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉ igor8i2016@yandex.ru

Article history

Received: May 27, 2022

Revised: August 22, 2022

Accepted: September 3, 2022

Keywords:

minimax, filtering, linear, autocorrelation, adaptive, nonlinear, Volterra series, interference, gradient, intensity, white noise

Abstract. The study solves the problem of filtering nonlinear systems based on the minimax adaptive algorithm of nonlinear systems by Volterra series of the second order, provided that the autocorrelation functions of the useful signal and interference are known with some errors according to the criterion of the maximum standard error of filtering. The author analyses the stationary performance of a minimax adaptive Volterra filter of the second order with the least mean square (LMS) with a constant step size of μ with a time-varying setting. A quantitative assessment of the steady-state excess root-mean-square error (RMSE) has been established, in which the contribution of incorrect gradient adjustment and tracking error is well characterized. Then the optimal step size is set for a time-varying second-order minimax Volterra filter. Thus, we can study the correlation between the excess MSE and the optimal step size, on the one hand, and the parameters of a time-varying nonlinear system, on the other hand. A simple solution with minimal root-mean-square error for the minimax Volterra filter is obtained, based on the assumption that the input signal of the filter is Gaussian. In addition, we propose an iterative factorization method for developing a subclass of minimax Volterra filters, which can greatly simplify filtering operations. In addition, an adaptive algorithm for the Volterra filter is investigated, as well as its average convergence and asymptotic excess root-mean-square error. Finally, the usefulness of the Volterra filter is demonstrated by its use in studies of nonlinear drift oscillations of moored vessels exposed to random sea waves.

For citation

Sidorov IG. Minimax adaptive filtering algorithm nonlinear systems with Volterra series of the second order. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):198–206. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-198-206>

Введение

В настоящей работе исследована проблема фильтрации нелинейных систем на основе минимаксного адаптивного алгоритма нелинейных систем рядами Вольтерра 2-го порядка при условии, что автокорреляционные функции полезного сигнала и помехи известны с некоторыми погрешностями. Для решения задачи идентификации нелинейных объектов разработано довольно много подходов и методов [1–10]. На современном этапе возросли требования к точностным характеристикам применяемых алгоритмов идентификации. В связи с этим модифицируются классические подходы к решению задачи идентификации нелинейных систем с целью повышения их точности и уменьшения ограничений применения [11], а также универсальные поисковые методы, кото-

рые требуют минимальной априорной информации об идентифицируемой системе, но сложны в реализации. Считаем также, что взаимокорреляционная функция полезного сигнала и помехи равна нулю, причем случайные функции полезного сигнала и помехи стационарны в узком смысле [12], стационарно связаны и имеют нулевые математические ожидания. Критерием качества считается максимальная среднеквадратическая ошибка фильтрации. Необходимо решить задачу минимаксной фильтрующей структуры в виде последовательности Вольтерра, когда случайный сигнал на входе системы задан с гауссовым белым шумом. Спектральные интенсивности погрешностей «шумовых добавок» сигнала и помехи пропорциональны величинам погрешностей, с которыми определены автокорреляционные функции сигнала и помехи. Показывается,

что минимаксный фильтр Вольтерра 2-го порядка (ФВ2) эквивалентен параллельной реализации минимаксного линейного фильтра и квадратичного фильтра. Аналогичная реализация фильтра ФВ2 была показана в работах [1; 2] для критерия качества по среднеквадратической ошибке фильтрации (СКОФ). В минимаксной постановке проблемы фильтрации рядами Вольтерра 2-го порядка решаются впервые, когда наблюдается эффективность за счет устойчивой фильтрации с увеличением интенсивности «добавок» белого шума, поскольку верхние оценки в ограничениях для асимптотического остатка СКОФ (АОСКОФ) для линейного и квадратичного фильтров обратно пропорциональны максимальному собственному числу для автокорреляционной матрицы входного сигнала с белым шумом при наличии помехи и его квадрату соответственно. Целью данной работы является изучение сходимости фильтра Вольтерра второго порядка по адаптивному методу наименьших квадратов (LMS). Анализируется фильтр Вольтерра с постоянным размером шага μ при изменяющейся во времени настройке и количественная оценка установившегося избыточного среднего квадрата ошибки (RMSE), где вклад неправильной регулировки градиента и ошибки отслеживания хорошо охарактеризованы в зависимости от максимального собственного числа наиболее неблагоприятной автокорреляционной матрицы входного сигнала. На первом этапе мы представляем количественную оценку избыточного среднего квадрата ошибки фильтрации и на втором этапе выводится оптимальное значение размера шага обучения сходимости фильтра. Подобные задачи часто встречаются в радиотехнических приложениях при оценке амплитуды детерминированного сигнала при колебаниях его формы и неточных коррекциях шума, то есть когда корреляционную функцию, которая лежит внутри заданного выпукло-ограниченного семейства, определить едва ли возможно. Другой пример – это оценивание регрессионных параметров детерминированного сигнала при неточно известной корреляционной функции, как основного сигнала, так и шума.

1. Постановка задачи

Возьмем фильтр Вольтерра 2-го порядка, который состоит из параллельной комбинации линейного и квадратичного фильтров [1; 2]:

$$y(n) = h_0 + \sum_{j=0}^{N-1} a(j)x(n-j) + \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} b(j,k)x(n-j)x(n-k), \quad (1)$$

где $\{a(j)\}$ и $\{b(j, k)\}$ называются линейным и квадратичным весом соответственно, а N указывает длину фильтра (предполагается симметричность квадратичных весов фильтра, то есть $b(j, k) = b(k, j)$). Будем предполагать, что случайный сигнал $x(n)$ представляет аддитивную смесь полезного сигнала $s(n)$ и помехи $\xi(n)$.

$$x(n) = s(n) + \xi(n), \quad (2)$$

причем $s(n)$ и $\xi(n)$ – это случайные стационарные в узком смысле [12] и стационарно связанные процессы с нулевым математическим ожиданием с дискретным параметром n , а их корреляционные функции известны с некоторыми погрешностями δR_s и δR_ξ соответственно

$$\tilde{R}_s(n, n') = R_s(n, n') + \delta R_s(n, n');$$

$$\tilde{R}_\xi(n, n') = R_\xi(n, n') + \delta R_\xi(n, n'),$$

где $R_s(n, n')$ и $R_\xi(n, n')$ – предполагаемые значения (например, некоторые оценки корреляционных функций).

Везде далее считается, что взаимно корреляционная функция сигнала $x(n)$ и помехи $\xi(n)$ тождественно равна нулю, полагаем также, что $R_s(n, n')$, $\delta R_s(n, n')$, $R_\xi(n, n')$, $\delta R_\xi(n, n')$ есть симметрические функции (в классе обобщенных функций) от перестановки аргументов. Эти функции можно рассматривать как ядра симметричных операторов $R_s, \tilde{R}_s, \delta R_s, R_\xi, \tilde{R}_\xi, \delta R_\xi$ в гильбертовом пространстве. Предполагается, что $\xi(n)$ белый гауссовский шум. Считается, что относительно погрешностей δR_s и δR_ξ известно лишь, что они ограничены по операторной норме

$$\|\delta R_s\| \leq \Delta_s, \|\delta R_\xi\| \leq \Delta_\xi,$$

где операторная норма $\|\cdot\|$ понимается как максимальное собственное число симметричного оператора.

Нужно найти веса фильтра A и B , которые минимизируют максимальную среднюю квадратичную ошибку фильтрации (СКОФ) между $s(n)$ и выходом фильтра $y(n)$, то есть

$$e(A, B, R_s + \delta R_s, R_\xi + \delta R_\xi) = E[|s(n) - y(n)|^2]; \quad (3)$$

$$e_{\max}(A, B) = \max_{\|\delta R_s\| \leq \Delta_s, \|\delta R_\xi\| \leq \Delta_\xi} e(A, B, R_s + \delta R_s, R_\xi + \delta R_\xi), \quad (4)$$

2. Алгоритм реализации Вольтера 2-го порядка

В определении минимума СКОФ фильтра Вольтера 2-го порядка является требование бездрейфового фильтра. С учетом бездрейфового выхода фильтра, другими словами, должно быть $E[y(n)] = 0$, так как основной сигнал имеет нулевое математическое ожидание. Тогда получается следующее соотношение для ФВ2 [2]:

$$y(n) = \sum_{j=0}^{N-1} a(j)x(n-j) + \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} b(j,k)[x(n-j)x(n-k) - r_x(j-k)], \quad (5)$$

где

$$r_x(j) = E[x(n)x(n-j)]$$

обозначает автокорреляционную функцию $x(n)$, E – символ математического ожидания.

Выражение (5) для ФВ2 можно представить в эквивалентном матричном виде

$$y(n) = A^T X(n) + \text{tr}\{B[X(n)X^T(n) - R_x]\}, \quad (6)$$

где $\text{tr}A$ обозначает след квадратной матрицы $A = \{a_{kj}\}_{k=1, N}^{j=1, N}$, то есть сумму ее диагональных элементов:

$$\text{tr}A = \sum_{k=1}^N a_{kk},$$

а R_x обозначает размером $N \times N$ автокорреляционную матрицу функции $x(n)$, чей (j, k) -й элемент равен $r_x(j-k)$.

$$X(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]^T,$$

$$A = [a(0), \dots, a(n-N+1)]^T,$$

$$B = \begin{pmatrix} b(0,0) & \dots & b(0,N-1) \\ & \dots & \\ b(N-1,0) & \dots & b(N-1,N-1) \end{pmatrix}$$

С учетом разложения всей СКОФ $e(A, B, R_s + \delta R_s, R_\xi + \delta R_\xi)$ на линейную СКОФ1 и квадратичную СКОФ2, получаем представление линейного и квадратичного операторов ФВ2 с минимальной СКОФ в виде [13]

$$A_0 = R_x^{-1} R_{sx},$$

$$B_0 = \frac{1}{2} R_x^{-1} T_{sx} R_x^{-1}, \quad (7)$$

где кросскорреляционные и бикросскорреляционные элементы матричных функций R_{sx} и T_{sx} соответственно определены следующим образом

$$r_{sx}(j) = E[s(n)x(n-j)],$$

$$t_{sx}(j, k) = E[s(n)x(n-j)x(n-k)]. \quad (8)$$

Из (5) и (6) видно, что линейный оператор оптимального ФВ2 – это то же самое, что и оптимальный минимаксный линейный фильтр. Следовательно, можно сконструировать ФВ2 просто посредством добавления квадратичного фильтра созданному оптимальному минимаксному линейному фильтру без его изменения, то есть в качестве линейного фильтра в смысле критерия (4) можно использовать минимаксный фильтр A^* , который минимизирует максимальную СКОФ из (4) (в заданном классе линейных фильтров) по всем наименее благоприятным значениям корреляционных операторов R_s^* и R_ξ^*

$$e_{\max}(A^*) = \min_A \max_{\|\delta R_s\| \leq \Delta_s, \|\delta R_\xi\| \leq \Delta_\xi} e(A, R_s + \delta R_s, R_\xi + \delta R_\xi) =$$

$$= \min_A \max_{R_s^*, R_\xi^*} e(A, \tilde{R}_s, \tilde{R}_\xi) =$$

$$= \max_{R_s^*, R_\xi^*} \min_A e(A, R_s^*, R_\xi^*) = \min_A e(A, R_s^*, R_\xi^*). \quad (9)$$

Причем наименее благоприятные значения корреляционных операторов будут равны

$$R_s^* = R_s + \Delta_s I, R_\xi^* = R_\xi + \Delta_\xi I, \quad (10)$$

где I – единичный оператор; Δ_s и Δ_ξ интенсивности «добавок» белого шума.

Поясним смысл термина интенсивность «добавок» белого шума. Поскольку ошибка в знании корреляционной функции флуктуаций или случайного сигнала компенсируется прибавлением добавки в виде белого шума со спектральной интенсивностью соответственно Δ_ξ или Δ_s , возрастающей при росте погрешности δR_ξ или δR_s , то сумма $R_\xi + \Delta_\xi I$ или $R_s + \Delta_s I$ равносильна добавлению к флуктуациям или случайному сигналу дополнительного белого шума. Операторная форма представления (10) аналогична матричному корреляционному представлению, в котором единичная матрица I соответствует в операторном виде единичному оператору в виде дельта функции Дирака, а матрицы $\Delta_\xi I$ и $\Delta_s I$ являются корреляционными матрицами добавок белого шума соответственно спектральной интенсивности Δ_ξ и Δ_s , а ядра симметричных операторов R_ξ и R_s и представляют соответствующие корреляционные матрицы. Как известно [14], минимаксный фильтр в этом случае примет вид

$$A^* = R_s^* (R_s^* + R_\xi^*)^{-1}, \quad (11)$$

а его максимальная СКОФ записывается в виде

$$e_{\max}^*(A^*) = \text{tr} R_s^* (R_s^* + R_\xi^*)^{-1} R_\xi^*.$$

Таким образом, можно сконструировать ФВ2 просто посредством добавления квадратичного фильтра параллельно созданному минимаксному фильтру без его изменения и потери существенной точности.

Следовательно, за счет введения «шумовых добавок» к основному сигналу и помехе мы можем достичь значительного выигрыша для асимптотического остатка среднеквадратической ошибки АОСКОФ, вследствие увеличения максимального собственного числа автокорреляционной матрицы, что эквивалентно уменьшению коэффици-

ента адаптации бучения в обратно пропорциональной зависимости этому максимальному собственному числу, в силу выбора наименее неблагоприятных зашумленных корреляционных матриц сигнала и помехи соответственно для минимаксного линейного фильтра. Пусть величина дисперсии по критерию наихудшей среднеквадратической ошибки для реализации ФВ2 ограничена величиной ξ_{opt} [13, формула (12)]:

$$\xi_{\text{opt}} = r_s(0) - R_{sx}^T (R_x^*)^{-1} R_{sx} - \left(\frac{1}{2}\right) \text{tr} [R_x^{-1} T_{sx} (R_x^*)^{-1} T_{sx}^*], \quad (12)$$

где

$$R_x^* = R_x + \Delta_x I; \quad r_s(0) = E[s^2(n)];$$

$$R_{sx} = R_x^* A; \quad T_{sx} = 2R_x^* B R_x^*,$$

где Δ_x соответствует интенсивности суммарных «добавок» белого шума во входном сигнале $x(n)$.

Метод наименьших квадратов для линейных и квадратичных весов адаптивного фильтра ФВ2 соответственно $A(n)$ и $B(n)$ может быть представлен как стохастический вариант метода наискорейшего спуска (LMS) в следующем виде [13]

$$A(n+1) = A(n) - 2\mu A e(n) X(n);$$

$$B(n+1) = B(n) - 2\mu B e(n) X(n) X^T(n). \quad (13)$$

Константы обучения μA и μB определяют устойчивость и сходимость адаптивного фильтра, $e(n) = y(n) - s(n)$. Заметим, что линейные и квадратичные оптимальные весовые коэффициенты ФВ2 изменяются в этом случае по следующей зависимости

$$A_0(n+1) = A_0(n) + \delta A_0(n);$$

$$B_0(n+1) = B_0(n) + \delta B_0(n), \quad (14)$$

где $\delta A_0(n) = A_0(n) - A_0$ и $\delta B_0(n) = B_0(n) - B_0$ – суть отклонения $A_0(n)$ и $B_0(n)$ от их оптимальных значений.

Как показано в [13; 15], в адаптивной реализации ФВ2 флуктуации операторов линейного и

квадратичного фильтров добавляют некоторую дополнительную СКОФ в выходное значение фильтра даже при устойчивом положении адаптационного процесса, то есть асимптотическая СКОФ адаптивного ФВ2 в общем случае больше, чем СКОФ оптимального ФВ2. Для оценки остатка СКОФ запишем СКОФ адаптивного ФВ2 в виде

$$\xi(n) = \xi_{\text{opt}} + \xi_A(n) + \xi_B(n),$$

где избыточные среднеквадратические остатки $\xi_A(n)$ и $\xi_B(n)$ в адаптивной реализации ФВ2 имеют вид

$$\xi_B(n) = E[\text{tr}\{\delta B^T(n)R_x\delta B(n)\}];$$

$$\xi_A(n) = E[\text{tr}\{\delta A^T(n)R_x\delta A(n)\}].$$

Асимптотические оценки СКОФ для линейного минимаксного и квадратичного фильтров реализации ФВ2 могут быть оценены сверху через оценку величины $r_s(0)$ следующим образом [13; 15]

$$\begin{aligned} \xi_A &\leq 4\mu A \xi_{\text{opt}} N r_s(0); \\ \xi_B &\leq 3\mu B \xi_{\text{opt}} N^2 r_s(0). \end{aligned} \quad (15)$$

Шаги обучения μA и μB для линейного минимаксного A и квадратичного фильтров B соответственно выбираются из условий

$$0 \leq \mu A \leq \lambda_{\text{max}}^{-1}; \quad 0 \leq \mu B \leq \lambda_{\text{max}}^{-2},$$

где λ_{max} – максимальное собственное число матрицы R_x^* , которое больше максимального собственного числа λ_{max} матрицы R_x на величину Δ_x согласно теореме Вейля [16, теорема (4.3.1)].

Из оценок представления для АОСКОФ в (12) видно, что за счет увеличения максимального собственного числа матрицы R_x^* можно повысить устойчивость и сходимость алгоритма и получить выигрыш η по среднеквадратическим ошибкам, который показывает наличие до-

полнительной информации о возмущениях в корреляционной матрице R_x основного сигнала и корреляционной матрице R_ξ , в частности для случая совместно гауссовских случайных процессов $x(n)$ и $s(n)$ [17] имеем

$$T_{sx} = 0$$

и выражение для выигрыша η по минимаксной среднеквадратической ошибке по отношению к среднеквадратической ошибке для фильтра, построенного по предлагаемым значениям R_s и R_x , принимает вид в матричной форме аналогичный виду в операторной форме [14, формула (5)]

$$\eta = 1 + \frac{\text{tr}(\Delta_s R_s - \Delta_\xi R_\xi)^2 (R_s + R_\xi)^{-2} (R_s + R_\xi + \Delta_x I + \Delta_\xi I)^{-1}}{\text{tr}(R_s + \Delta_s I) (R_s + R_\xi + \Delta_s I + \Delta_\xi I)^{-1} (R_\xi + \Delta_\xi I)}. \quad (16)$$

Чем больше Δ_s или Δ_ξ , тем больше эффективность минимаксного фильтра, а значит и фильтра Вольterra 2-го порядка (ФВ2). В частности при $\Delta_\xi I \gg R_\xi$, $\Delta_s = 0$ оценка выигрыша η будет линейно зависимой от величины шумовой добавки Δ_ξ и будет равна

$$\eta \cong 1 + \Delta_\xi \frac{\text{tr} R_\xi^2 (R_s + R_\xi)^{-2}}{\text{tr} R_\xi}. \quad (17)$$

Аналогично этому случаю можно рассмотреть другой крайний случай при $\Delta_s I \gg R_s$, $\Delta_\xi = 0$ и получить оценку для выигрыша η в виде

$$\eta \cong 1 + \Delta_s \frac{\text{tr} R_s^2 (R_s + R_\xi)^{-2}}{\text{tr} R_s}. \quad (18)$$

Можно показать также, что при медленном изменении параметров модели адаптации обучения ФВ2 оптимальное значение шага обучения будет равно

$$\begin{aligned} \mu_{\text{opt}} &= \mu A = \mu B = \\ &= \sqrt{\frac{N(\sigma_{NSA}^2 + \sigma_{NSB}^2)}{J_{\text{min}}[4N\sigma_x^2 + 2\text{tr}(R_x^2) + N^2(\sigma_x^2)^2]}}, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$\sigma_x^2 = E[x^2(n)];$$

$$J_{\min} = \text{cov}(e(n)); \quad e(n) = y(n) - s(n);$$

$$\sigma_{NSA}^2 = \text{cov}(\Delta A_0(n)) = \frac{1}{N} E[\text{tr}(\Delta A_0 \Delta A_0^T)];$$

$$\sigma_{NSB}^2 = \text{cov}(\Delta B_0(n)) = \frac{1}{N} E[\text{tr}(\Delta B_0 \Delta B_0^T)],$$

то есть как это следует из (18) эффективность полученного оптимального фильтра Вольтерра 2-го порядка (ФВ2) по шагу адаптации обучения также находится в обратной пропорциональной зависимости при значительном увеличении уровня шумовых добавок в возмущениях в корреляционной матрице R_x основного сигнала.

3. Пример эффективности фильтра Вольтерра 2-го порядка с одновременной реализацией линейного минимаксного фильтра

Чтобы проиллюстрировать эффективность алгоритма, было проведено компьютерное моделирование. Линейный минимаксный фильтр как эквивалентная замена линейному фильтру использовался для оценки системы Вольтерра второго порядка с гауссовым входом $x(n)$, то есть во входном сигнале $x(n)$ присутствует аддитивный гауссовский белый шум и выходом $y(n)$ в нестационарной и шумной среде на модельном примере:

$$y(k) = x(k) - 0,5x(k-1) + x^2(k) + \\ + 0,1x^2(k-1) - 0,4x(k)x(k-1) + n(k).$$

В выходном сигнале $y(n)$ через $n(k)$ обозначен белый шум известной интенсивности. На рисунке показан график зависимости оптимального размера шага обучения μ_{opt} от величины J_{\min} от различных значений интенсивностей «шумовой добавки» Δ_x в помехе входного сигнала $x(n)$ при постоянных ковариациях σ_{NSA}^2 и σ_{NSB}^2 девиаций параметров весовых коэффициентов $A(n)$ и $B(n)$ и постоянном отношении сигнала к шуму SNR в наблюдении выходного сигнала $y(n)$ равном 25 дБ.

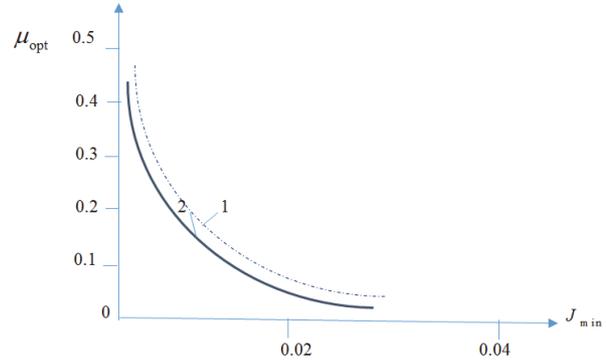


График зависимости оптимального размера шага обучения μ_{opt} от величины J_{\min} от различных значений интенсивностей «шумовой добавки»: пунктирный график – $\Delta_x = 10$; сплошной график – $\Delta_x = 5$ SNR = 25 дБ;

$$\sigma_{NSA}^2 = \sigma_{NSB}^2 = 2,5 \cdot 10^{-6}; \quad \sigma_x = 0,0017$$

A graph of the dependence of the optimal size of the learning step μ_{opt} on the magnitude J_{\min} of the various values of the intensities of the “noise additive:” dotted graph – $\Delta_x = 10$; solid graph – $\Delta_x = 5$ SNR = 25 дБ;

$$\sigma_{NSA}^2 = \sigma_{NSB}^2 = 2,5 \cdot 10^{-6}; \quad \sigma_x = 0,0017$$

Из построения графика зависимости оптимального размера шага обучения μ_{opt} от величины J_{\min} от различных значений интенсивностей «шумовой добавки» Δ_x в помехе входного сигнала $x(n)$ видно, что с увеличением уровня интенсивностей Δ_x величина оптимального шага обучения монотонно убывает и достигает оптимального постоянного уровня на второй кривой обучения, что согласуется с теоретическими выводами, сделанными выше в контексте статьи по оптимальному поведению шага адаптации в зависимости от уровня изменения интенсивностей шумовых добавок в дополнительном увеличении уровня помехи входного сигнала.

Заключение

Таким образом, задача по определению линейного и квадратичного операторов фильтра Вольтерра 2-го порядка с минимаксной средней квадратичной ошибкой для идентификации нелинейных стационарных систем решена и реализована в алгоритмическом виде. Показана эффективность адаптивного устойчивого фильтра Вольтерра 2-го порядка для совместно гауссовских случайных процессов полезного и наблюдаемого сигналов в условиях неточно известного сигнала в шуме и с неточно известными корреляционными свойствами. Дальнейшей задачей будет являться усовершенствование этого метода

и применение фильтра Вольтерра для идентификации многомерных динамических нелинейных систем управления с интервальными параметрами, в задачах оценивания регрессионных интервальных параметров полезного сигнала.

Список литературы

1. Пупков К.А., Капалин В.И., Ющенко А.С. Функциональные ряды в теории нелинейных систем. М.: Наука, 1976. 448 с.

2. Пупков К.А., Цибизова Т.Ю. Реализация фильтра Вольтера второго порядка для идентификации нелинейных систем управления // Наука и образование: научное издание МГТУ имени Н.Э. Баумана. 2006. № 6. С. 3.

3. Бобрешов А.М., Мымрикова Н.Н. Проблемы анализа сильно нелинейных режимов электронных устройств на основе рядов Вольтерры // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2013. № 2. С. 1–25.

4. Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1982. 304 с.

5. Heiskanen A., Rahkonen T. 5th Order multi-tone Volterra simulator with component level output // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2002. Vol. 3. Pp. 591–594. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2002.1010293>

6. Kolding T.E., Larsen T. High order Volterra series analysis using parallel computing // International Journal of Circuit Theory and Applications. 1997. Vol. 25. No. 2. Pp. 107–114.

7. Helie T., Laroche B. Computation of convergence bounds for Volterra series of linear analytic single-input systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 2011. Vol. 56. No. 9. Pp. 2062–2072.

8. Peng Z.K., Lang Z.Q. On the convergence of the Volterra series representation of the Duffing's oscillators subjected to harmonic excitations // Journal of Sound and Vibration. 2007. Vol. 305. No. 1–2. Pp. 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.03.062>

9. Wang T., Brazil T.J. Volterra-mapping-based behavioral modeling of nonlinear circuits and systems for high frequencies // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2007. Vol. 51. No. 5. Pp. 1433–1440. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.810151>

10. Zhu Q., Dooley J., Brazil T.J. Simplified Volterra series based behavioral modeling of RF power amplifiers using deviation – reduction // International Microwave Symposium Digest. 2006. Pp. 1113–1116. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2006.249958>

11. Лукьянова Н.В., Кузнецов И.А. Идентификация нелинейных динамических систем на основе разложения функционалов методом Винера // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2014): материалы конференции. СПб., 2014. С. 633–636.

12. Пугачев В.С. Теория случайных функций. Ленинград: Физматгиз, 1962. 883 с.

13. Koh T., Powers E.J. Second-order Volterra filtering and its application to non-linear system identification // IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1985. Vol. ASSP-33. No. 6. Pp. 1445–1455. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1985.1164730>

14. Кузнецов В.П. Об устойчивой линейной фильтрации случайных сигналов // Радиотехника и электроника. 1975. № 1. С. 2405–2408.

15. Sayadi M., Fnaiech F., Guillon S., Najim M. Steady-state performance analysis of the LMS adaptive time-varying second order Volterra filter // 1996 8th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 1996). Trieste; 1996. Pp. 1–5.

16. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989.

17. Reed I.S. On a moment theorem for complex Gaussian processes // IRE Transaction on Information. 1962. Vol. 8. No. 3. Pp. 194–195. <https://doi.org/10.1109/TIT.1962.1057719>

References

1. Pupkov KA, Kapalin VI, Yushchenko AS. *Functional series in the theory of nonlinear systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1976. (In Russ.)

2. Pupkov KA, Tsibizova TYu. Implementation of the second-order Volterra filter for identification of nonlinear control systems. *Science and Education: Electronic Scientific and Technical Publication*. 2006;(6):3. (In Russ.)

3. Bobreshov AM, Mymrikova NN. The problems of strongly nonlinear analysis for electron circuits based on Volterra series. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*. 2013;(2):15–25. (In Russ.)

4. Volterra V. *Theory of functionals, integral and integro-differential equations*. Moscow: Nauka Publ.; 1982. (In Russ.)

5. Heiskanen A, Rahkonen T. 5th Order multi-tone Volterra simulator with component level output. *2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 2002; 3:591–594. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2002.1010293>

6. Kolding TE, Larsen T. High order Volterra series analysis using parallel computing. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. 1997;25(2):107–114.

7. Helie T, Laroche B. Computation of convergence bounds for Volterra series of linear analytic single-input systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2011;56(9):2062–2072.

8. Peng ZK, Lang ZQ. On the convergence of the Volterra series representation of the Duffing's oscillators subjected to harmonic excitations. *Journal of Sound and Vibration*. 2007;305(1–2):322–332. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.03.062>

9. Wang T, Brazil TJ. Volterra-mapping-based behavioral modeling of nonlinear circuits and systems for high frequencies. *IEEE Transactions on Micro-*

wave Theory and Techniques. 2007;51(5):1433–1440. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.810151>

10. Zhu Q, Dooley J, Brazil TJ. Simplified Volterra series based behavioral modeling of RF power amplifiers using deviation – reduction. *International Microwave Symposium Digest*. 2006. p. 1113–1116. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2006.249958>

11. Lukyanova NV, Kuznetsov IA. Identification of nonlinear dynamic systems based on the decomposition of functionals by the Wiener method. *Management in Marine and Aerospace Systems (UMAS-2014): Materials of the Conference*. St. Petersburg; 2014. p. 633–636. (In Russ.)

12. Pugachev VS. *Theory of random functions*. Leningrad: Fizmatgiz Publ.; 1962. (In Russ.)

13. Koh T, Powers EJ. Second-order Volterra filtering and its application to non-linear system

identification. *IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1985;ASSP-33(6):1445–1455. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1985.1164730>

14. Kuznetsov VP. On stable linear filtering of random signals. *Radio Engineering and Electronic Physics*. 1975;(1):2405–2408. (In Russ.)

15. Sayadi M, Fnaiech F, Guillon S, Najim M. Steady-state performance analysis of the LMS adaptive time varying second order Volterra filter. *1996 8th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 1996)*. Trieste; 1996. p. 1–5. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.36117>

16. Horn R, Johnson Ch. *Matrix analysis*. Moscow: Mir Publ.; 1989. (In Russ.)

17. Reed IS. On a moment theorem for complex Gaussian processes. *Ire Transaction on Information*. 1962;8(3):194–195. <https://doi.org/10.1109/TIT.1962.1057719>

Сведения об авторе

Сидоров Игорь Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент департамента прикладной информатики, Московский политехнический университет (Московский Политех), Российская Федерация, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38; ORCID: 0000-0003-4691-4855, eLIBRARI SPIN-код: 1676-7269; igor8i2016@yandex.ru

About the author

Igor G. Sidorov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Informatics, Moscow Polytechnic University, 38 Bolshaya Semyonovskaya St, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4691-4855, eLIBRARI SPIN-code: 1676-7269; igor8i2016@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-207-212
УДК 629.5.083.5

Научная статья / Research article

Алгебраические судовые поверхности с каркасом из трех плоских кривых в координатных плоскостях

С.Н. Кривошапко

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
✉ sn_krivoshapko@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 25 июня 2022 г.
Доработана: 20 августа 2022 г.
Принята к публикации: 5 сентября 2022 г.

Ключевые слова:

судовой корпус, суперэллипс, компьютерное моделирование, ватерлиния, мидельшпангоут, главный батокс, алгебраическая поверхность

Аннотация. Выбор рациональной формы поверхности для судовых корпусов – одна из важных задач корабельных архитекторов и проектировщиков. Часто выбор формы основывается на эмпирических формулах или интуиции проектировщика. В исследовании рассматривается методика определения обобщенных явных алгебраических уравнений теоретической формы корпуса судна с наперед заданными тремя главными поперечными сечениями, совпадающими с ватерлинией, главным батоксом (килевой линией) и мидельшпангоутом, которые принимаются в форме суперэллипсов или в форме любой алгебраической кривой. Приведенная тройка алгебраических уравнений поверхностей с одинаковым каркасом из трех плоских кривых описывает бесконечное число форм судовых поверхностей. Показывается, что, имея одинаковые три плоские кривые главного каркаса, можно получить три алгебраические поверхности разных порядков. Выбрать оптимальную форму, в том числе с цилиндрической вставкой или принимая форму корпуса, состоящую из двух разных – кормовой и носовой – оконечностей, стыкующихся гладко по мидельшпангоуту, возможно с помощью методов компьютерного моделирования с привлечением искусственного интеллекта, используя материалы исследования. Приведенные результаты применимы для проектирования подводных аппаратов на начальном этапе.

Для цитирования

Кривошапко С.Н. Алгебраические судовые поверхности с каркасом из трех плоских кривых в координатных плоскостях // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 207–212. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-207-212>

Algebraic ship hull surfaces with a main frame from three plane curves in coordinate planes

Sergey N. Krivoshapko

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation
✉ sn_krivoshapko@mail.ru

Article history

Received: June 25, 2022
Revised: August 20, 2022
Accepted: September 5, 2022

Abstract. One of the important problems of naval architects and designers is a choice of rational ship hull shape. A choice of ship hull form is based often on empirical formulae or on designers' intuition. In the study, a method of determination of generalized explicit algebraic equations of theoreti-



Keywords:

ship hull, superellipse, computer modeling, waterline, main buttock, midship section, algebraic surface

cal ship hull configuration with three main cross sections given in advance and coinciding with waterline, main buttock (keel line), and midship section that are taken in the form of superellipses or in the form of any algebraic curve. Presented three of algebraic equations of surfaces with the same frame from three plane curves describes infinite number of ship hull surfaces. Having the same three plane curves one can get three algebraic surfaces of different order. The optimal shape, including cylindrical fragment or the ship hull shape containing two different – stern and bow – parts, joining along midship section, can be chosen with the help of methods of computer modelling with the application of artificial intellect using the materials of the paper. One can apply given results for the design of underwater apparatus on the early stage of the design.

For citation

Krivoshapko SN. Algebraic ship hull surfaces with a main frame from three plane curves in coordinate planes. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):207–212. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-207-212>

Введение

Е.Я. Авдоньев [1] показал, что имея три плоские кривые (рис. 1), совпадающие с мидельшпангоутом (в сечении плоскостью yOz), главным батоксом (в сечении диаметральной плоскостью xOz) и ватерлинией (в сечении плоскостью xOy), можно построить три алгебраические поверхности разных порядков. Одну из них можно взять в первом приближении за форму проектируемого судового корпуса. Далее по необходимости можно приступить к формированию цилиндрической вставки, или принять форму корпуса, состоящую из двух разных поверхностей (носовая часть и кормовая оконечность) и стыкующихся гладко по мидельшпангоуту. Приняв полученную базовую форму как первый шаг к получению новой формы путем итерации, можно приступить к оптимизации формы корпуса [2]. Например, аппроксимировать базовую форму кусками развертывающейся поверхности, что упростит [3] и удешевит [4] изготовление обшивки.

1. Обзор исследований по формированию рациональных судовых корпусов

По-видимому, Е.А. Авдоньев [1] впервые предложил проектировать судовые корпуса, имея в наличии заданные плоские кривые, лежащие в трех главных координатных плоскостях и совпадающие с ватерлинией (кривая 1 в плоскости $z = 0$), мидельшпангоутом (кривая 2 в плоскости $x = 0$) и главным батоксом (кривая 3 в плоскости $y = 0$) (рис. 1).

Используя методику, изложенную в [1], С.Н. Кривошапко [5] получил уравнения тройки алгебраических поверхностей, содержащих один и тот же каркас их плоских кривых. В первом

примере за плоские кривые взяты в качестве кривой 1 квадратная парабола

$$y = \pm W[1 - (x/L)^2], \quad (1)$$

в качестве кривой 2 взят эллипс

$$(y/W)^2 + (z/T)^2 = 0, \quad (2)$$

а в качестве кривой 3 взята квадратная парабола

$$z = -T + T(x/L)^2. \quad (3)$$

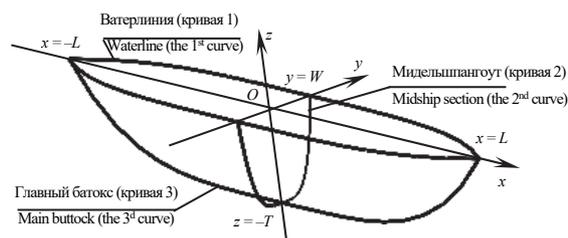


Рис. 1. Поверхность с каркасом из трех плоских кривых
Figure 1. A surface with frame from three plane curves

В итоге получено алгебраическое уравнение четвертого порядка первой поверхности, образованной семейством параболических линий, лежащих в плоскостях $z = \text{const}$ (рис. 1):

$$\pm y = W \sqrt{1 - \frac{z^2}{T^2}} \left[1 - \frac{x^2}{L^2 \left(1 + \frac{z}{T}\right)} \right]. \quad (4)$$

Получено также алгебраическое уравнение четвертого порядка второй гидродинамической поверхности, образованной семейством эллиптических сечений $x = \text{const}$:

$$T^2y^2 + W^2z^2 = W^2T^2(1 - x^2/L^2)^2. \quad (5)$$

И, наконец, третья поверхность, образованная семейством параболических линий $y = \text{const}$, будет иметь следующую форму задания:

$$z = -T\sqrt{1 - \frac{y^2}{W^2}} \left(1 - \frac{x^2}{L^2\left(1 - \frac{y}{W}\right)}\right). \quad (6)$$

Алгебраическая поверхность (6) является поверхностью пятого порядка.

Подставляя $z = 0$ в уравнения трех поверхностей (4)–(6), получаем уравнение ватерлинии (1). Подставляя $x = 0$, получаем уравнение кривой 2, а при $y = 0$ – уравнение кривой 3. Следовательно три поверхности (4)–(6) имеют один и тот же каркас из заданных плоских кривых (1)–(3).

Рассмотрим сечения $x = x_c = \text{const}$ на поверхности (5):

$$\frac{z^2}{T^2\left(1 - \frac{x_c^2}{L^2}\right)^2} + \frac{y^2}{W^2\left(1 - \frac{x_c^2}{L^2}\right)^2} = 1. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что все сечения $x = x_c = \text{const}$ на поверхности (5) будут эллиптическими. А сечения $x = x_c = \pm L$ вырождаются в точки $z = y = 0$ (рис. 1).

По аналогии можно показать, что сечения $y = y_c = \text{const}$ и $z = z_c = \text{const}$ на поверхности (5) не будут параболическими.

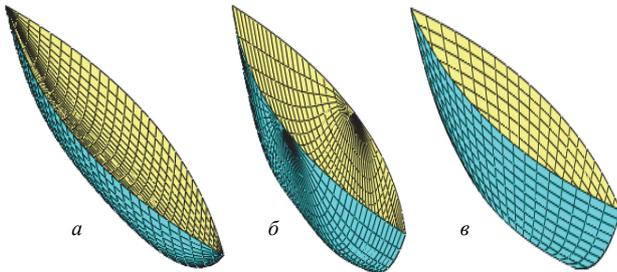


Рис. 2. Поверхности, построенные по формулам: а – (8); б – (9); в – (10)
Figure 2. Surfaces designed with the help of the formulae: а – (8); б – (9); в – (10)

В [5] дан второй пример с плоскими кривыми каркаса, где ватерлиния дана в виде квадратной параболы, а главный батокс и мидельшпангоут представлены в виде биквадратных парабол. В этом случае тройку поверхностей можно задать алгебраическими уравнениями:

– поверхность седьмого порядка образована биквадратными параболой в сечениях $x = \text{const}$:

$$z = T \left[\frac{x^4}{L^4} + \frac{\left(1 + \frac{x^2}{L^2}\right)}{W^4\left(1 - \frac{x^2}{L^2}\right)^3} y^4 \right]; \quad (8)$$

– поверхность восьмого порядка образована биквадратными параболой в сечениях $y = \text{const}$:

$$z = T \left[\frac{y^4}{W^4} + \frac{x^4\left(1 - \frac{y^4}{W^4}\right)}{L^4\left(1 - \frac{y}{W}\right)^2} \right]; \quad (9)$$

– поверхность одиннадцатого порядка образована квадратными параболой в сечениях $z = \text{const}$:

$$y = W\sqrt[4]{\frac{z}{T}} \left(1 - \frac{x^2}{L^2\sqrt{\frac{z}{T}}}\right). \quad (10)$$

На рис. 2 показаны поверхности, задаваемые формулами (8)–(10). Предварительно поверхности (8)–(10) были переведены в параметрическую форму задания [5].

Еще два примера приведены в [6]. Здесь задан следующий каркас из трех плоских кривых (рис. 1):

– ватерлиния в форме параболы 4-го порядка в плоскости xOy :

$$y = \pm W(1 - x^4/L^4); \quad (11)$$

– мидельшпангоут в форме кривой 6-го порядка в плоскости yOz :

$$z = -T\sqrt{1 \mp \left(\frac{y}{W}\right)^{\frac{1}{3}}}; \quad (12)$$

– главный батокс в форме параболы 4-го порядка в плоскости xOz :

$$z = T(x^4/L^4 - 1). \quad (13)$$

Три поверхности, содержащие три плоские кривые (11)–(13), можно задать в явном виде:

– образующие сечения $x = \text{const}$:

$$z = T\left(\frac{x^4}{L^4} - 1\right) \sqrt{1 - \left(\frac{y}{W\left(1 - \frac{x^4}{L^4}\right)}\right)^{\frac{1}{3}}}; \quad (14)$$

– образующие сечения $y = \text{const}$:

$$z = T \sqrt{1 \mp \sqrt[3]{\frac{y}{W}}} \cdot \left[\frac{W}{L^4(W \mp y)} x^4 - 1 \right]; \quad (15)$$

образующие сечения $z = \text{const}$:

$$y = \mp \frac{W}{T^6} (z^2 - T^2)^3 \left[1 - \frac{x^4 T}{L^4(z+T)} \right]. \quad (16)$$

Во втором примере в [6] все три кривые главного каркаса являются биквадратными парабололами. В этом случае также можно получить три поверхности:

– образующие сечения $x = \text{const}$:

$$z = -T \left[1 - \frac{x^4}{L^4} - \frac{y^4}{W^4 \left(1 - \frac{x^4}{L^4} \right)^3} \right]; \quad (17)$$

– образующие сечения $y = \text{const}$:

$$z = -T \left(1 - \frac{y^4}{W^4} \right) \left(1 - \frac{x^4}{L^4 \left(1 \mp \frac{y}{W} \right)} \right); \quad (18)$$

– образующие сечения $z = \text{const}$:

$$y = \pm W^4 \sqrt{1 + \frac{z}{T}} \left[1 - \frac{x^4}{L^4(1+z/T)} \right]. \quad (19)$$

2. Обобщенный подход к поиску рациональных алгебраических судовых поверхностей

Предположим, что плоские кривые главного каркаса рассматриваемых поверхностей (рис. 1) заданы в виде [7]:

– ватерлиния (кривая 1):

$$|y|^r = W^r \left(1 - \frac{|x|^t}{L^t} \right); \quad (20)$$

– мидельшпангоут (кривая 2):

$$|z|^n = T^n \left(1 - \frac{|y|^m}{W^m} \right); \quad (21)$$

– главный батокс (кривая 3):

$$|z|^s = T^s \left(1 - \frac{|x|^k}{L^k} \right), \quad (22)$$

где для выпуклых кривых $r, t, n, m, s, k > 1$; для вогнутых кривых $r, t, n, m, s, k < 1$.

Используя методику, изложенную в [1; 5–8], можно получить явные уравнения трех алгебраических поверхностей с одним и тем же главным каркасом (20)–(22):

– с образующим семейством сечений $x = \text{const}$:

$$|z| = T \left(1 - \frac{|x|^k}{L^k} \right)^{\frac{1}{s}} \times \left[1 - |y/W|^m / (1 - |x/L|^t)^{m/r} \right]^{1/n}; \quad (23)$$

– образующим семейством сечений $y = \text{const}$:

$$|z| = T (1 - |y|^m / W^m)^{1/n} \times \left[1 - |x/L|^k / (1 - |y/W|^r)^{k/t} \right]^{1/s}; \quad (24)$$

– образующим семейством сечений $z = \text{const}$:

$$|y| = W (1 - |z|^n / T^n)^{1/m} \times \left[1 - |x/L|^t / (1 - |z/T|^s)^{t/k} \right]^{1/r}. \quad (25)$$

Формулы (20)–(22) и (23)–(25) имеют одинаковую структуру. Пользуясь тензорными обозначениями, их можно записать в виде двух формул.

Такой подход к проектированию судовых корпусов дает возможность получить явные уравнения теоретических корпусов в неограниченном количестве. Если принять $r = t, n = m, s = r$, то плоские кривые (20)–(22) будут представлять собою суперэллипсы. Если дополнительно взять, что $W = L = T$, то суперэллипсы становятся кривыми Ламе.

Положив в уравнениях (23)–(25) $z = 0$, получим уравнение ватерлинии (20), при $x = 0$ получаем уравнение мидельшпангоута (21), а при $y = 0$ – уравнение главного батокса (22). Уравнения (23)–(25) описывают все ранее полученные в [1; 5–6] судовые поверхности.

Например, рассматривая формулы (1)–(3) и сравнивая их с формулами (20)–(22), находим показатели степеней $r = 1, t = 2, n = m = 2, s = 1, k = 2$. Подставляя эти значения в уравнения (23)–(24), получаем уравнения рассматриваемых поверхностей (4)–(6).

Подставляя показатели степеней $r = 1, t = 2, n = 1, m = 4, s = 1, k = 4$ в уравнения (23)–(24), получаем уравнения трех гидродинамических поверхностей (8)–(10), которые изображены на рис. 2.

Сравнивая уравнения (11)–(13) и (20)–(22), определяем $r = 1, t = 4, n = 2, m = 1/3, s = 1, k = 4$. Подставляем эти значения в уравнения (23)–(25), получаем уравнения трех гидродинамических поверхностей (14)–(16), рассмотренных в [3].

Для кривых главного каркаса 4-го порядка имеем $r = 1, t = 4, n = 1, m = 4, s = 1, k = 4$. Подстановкой полученных показателей степеней в уравнения (23)–(25), находим уравнения трех поверхностей (17)–(19).

3. Результаты

Таким образом, нет необходимости рассматривать каждую тройку поверхностей с одинаковым главным каркасом, как это делалось в статьях [1; 5; 6]. Формулы (23)–(25) описывают весь набор алгебраических поверхностей, задаваемых в явном виде. В [8] мидельшпангоут (кривая 2) рассматривается уже как суперэллипс (21), что расширяет возможности компьютерного моделирования. В [7] используются формулы (20)–(22) и (23)–(25) применительно к суперэллипсам для моделирования замкнутых составных поверхностей.

Однако не все алгебраические кривые позволяют задать себя в виде (20)–(22), и, соответственно, не всегда будет возможность использовать формулы (23)–(25). Два примера с кривыми Агнеси, входящими в главный каркас гидродинамических поверхностей рассмотрены в [9].

Как отмечается в [6], выбор формы корпуса обусловлен многими факторами: назначение судна, очертание ватерлинии, сопротивление воды, трудоемкость изготовления [10], разделение на конструктивные модули [11], скорость движения судна [12], архитектурные требования [13] и др. [14]. Эти факторы влияют на выбор плоских кривых основного каркаса. Наличие формул (20)–(22) и (23)–(25) позволит облегчить выбор поверхности судового корпуса, используя аналитические зависимости, что может снизить первоначальные затраты на начальных этапах проектирования.

Имея аналитические поверхности (23)–(25), дальше можно рассматривать вопросы формовки внешнего судового корпуса из тонкого листа [4; 15], решать проблемы прочности и т. д.

Заключение

Представленные материалы позволяют поставить выбор рациональной (оптимальной) судовой поверхности в автоматизируемом режиме.

После того как выбрана подходящая форма судовой поверхности, судовые архитекторы начинают работать над формообразованием судового корпуса, поэтому часто требуется аппроксимация теоретической судовой поверхности торсовой. В этом случае наиболее подходящим вариантом будет поверхность, сформированная семейством линий, лежащих в плоскостях $z = \text{const}$. Эта поверхность поддается аппроксимации торсовыми полосами лучше всего.

Список литературы

1. Авдоньев Е.Я. Аналитическое описание корпусных поверхностей // Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев, 1972. Вып. 15. С. 156–160.
2. Janson C., Larsson L. A method for the optimization of ship hulls from a resistance point of view // National Research Council. Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamic. Washington: The National Academies Press, 1997. Pp. 680–696. <https://doi.org/10.17226/5870>
3. Oliveira M.C., Fernandes José V. Modelling and simulation of sheet metal forming processes // Metals. 2019. Vol. 9. No. 12. Article number: 1356. <https://doi.org/10.3390/met9121356>
4. Oetter R., Barry C.D., Duffy B., Welter J. Block construction of small ships and boats through use of developable panels // Journal of Ship Production. 2002. Vol. 18. No. 2. Pp. 65–72. <https://doi.org/10.5957/jsp.2002.18.2.65>
5. Кривошапко С.Н. Гидродинамические поверхности // Судостроение. 2021. № 3. С. 64–67. https://doi.org/10.54068/00394580_2021_3_64
6. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Алгебраические поверхности для рациональных судовых корпусов // Технология машиностроения. 2022. № 3. С. 17–24. <https://doi.org/10.34641/ТМ.2022.237.3.016>
7. Карневич В.В. Построение гидродинамических поверхностей каркасами из кривых Ламе на примере корпуса подводной лодки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 30–37. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-30-37>
8. Karnevich V.V. Hydrodynamic surfaces with midship section in the form of the Lamé curves // RUDN Journal of Engineering Researches. 2021. Vol. 22. No. 4. Pp. 323–328. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328>
9. Krivoshapko S.N. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design // Ships and Offshore Structures. 2022. Pp. 1–9. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2062165>

10. Морозов В.Н., Цветков В.В. К вопросу выбора схемы изготовления днищевых секций корпусов // Вестник Российской академии естественных наук: сборник научных трудов. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2013. Вып. 7. С. 80–85.

11. Розинов А.Я. Технологическое совершенствование конструкции корпуса катеров и процесса их сборки // Технология машиностроения. 2020. № 5. С. 15–23.

12. Бронский А.И., Глоzman М.К., Козляков В.В. Основы выбора конструкций корпуса судна. Л.: Судостроение, 1974. 250 с.

13. Kwang Hee Ko. A survey: Application of geometric modeling techniques to ship modeling and design // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2010. Vol. 2. Pp. 177–184. <http://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0034>

14. Zhang Sh., Tezdogan T., Zhang B., Lin L. Research on the hull form optimization using the surrogate models // Engineering Applications of Computational Mechanics. 2021. Vol. 15. Issue 1. Pp. 747–761. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1915875>

15. Баджория Г.Ч. Об одном методе построения развертки торсовой поверхности // Судостроение. 1984. № 9. С. 37–38.

References

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

2. Janson C, Larsson L. A method for the optimization of ship hulls from a resistance point of view. *National Research Council. Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamic*. Washington: The National Academies Press; 1997. p. 680–696. <https://doi.org/10.17226/5870>

3. Oliveira MC, Fernandes José V. modelling and simulation of sheet metal forming processes. *Metals*. 2019;9(12):1356. <https://doi.org/10.3390/met9121356>

4. Oetter R, Barry CD, Duffty B, Welter J. Block construction of small ships and boats through use of de-

velopable panels. *Journal of Ship Production*. 2002;18(2): 65–72. <https://doi.org/10.5957/jsp.2002.18.2.65>

5. Krivoshapko SN. Hydrodynamic surfaces. *Shipbuilding*. 2021;(3):64–67. (In Russ.) https://doi.org/10.54068/00394580_2021_3_64

6. Krivoshapko SN, Ivanov VN. Algebraic surfaces for rational ship hulls. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2022;(3):17–24. <https://doi.org/10.34641/TM.2022.237.3.016>

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

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

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

10. Morozov BN, Tzvetkov VV. On the question of choice of scheme of making bottom section of hulls. *Vesnik RAEN* (issue 7). Kaliningrad: KGTU Publ.; 2013. p. 80–85. (In Russ.)

11. Rozinov AYa. Technological improvement of the hull boats design and the process of their assembly. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2020;(5):15–23. (In Russ.)

12. Bronskiy AI, Glozman MK, Kozlyakov VV. *The basis of choice of structures of ship hull*. Leningrad: Sudostroeniye Publ.; 1974. (In Russ.)

13. Kwang Hee Ko. A survey: application of geometric modeling techniques to ship modeling and design. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2010;2:177–184. <http://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0034>

14. Zhang Sh, Tezdogan T, Zhang B, Lin L. Research on the hull form optimization using the surrogate models. *Engineering Applications of Computational Mechanics*. 2021; 15(1):747–761. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1915875>

15. Bajoria GCh. On one method of the development of a torse surface. *Shipbuilding*. 1984;(9):37–38.

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

About the author

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



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-213-223
УДК 62-233.27

Научная статья / Research article

Исследование влияния степени соприкосновения поверхностей качения на контактные напряжения в шариковых радиальных подшипниках

Ю.В. Белоусов^a  , В.В. Кириловский^a , Ф.В. Рекач^b 

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

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
 juvbelousov@bmstu.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 26 июня 2022 г.
Доработана: 27 августа 2022 г.
Принята к публикации: 9 сентября 2022 г.

Ключевые слова:

шариковый радиальный подшипник, коэффициент, степени соприкосновения, поверхности качения, контактные напряжения, дорожки качения

Аннотация. Исследование посвящено определению коэффициентов степени соприкосновения поверхностей качения с учетом поля допуска тел качения, а также влияния коэффициентов степени соприкосновения на максимальные контактные напряжения в шариковых радиальных подшипниках. Разработана методика определения максимальной величины коэффициента степени соприкосновения поверхностей качения шариковых радиальных подшипников с учетом поля допуска тел качения. Установлено, что коэффициент степени соприкосновения поверхностей качения для каждого типоразмера подшипника с определенным радиусом дорожек качения располагается в диапазоне, который зависит от предельных размеров тел качения. Показано, что коэффициент степени соприкосновения тел качения с дорожками наружного кольца при одинаковой вспомогательной величине, учитывающей сумму и разность кривизн поверхностей качения, больше, чем внутреннего. Поэтому для снижения контактных напряжений на наружном кольце подшипника радиус его дорожки качения может быть выполнен меньше, чем на внутреннем. Разработана методика расчета максимальных контактных напряжений на дорожках качения шариковых радиальных подшипников с учетом коэффициента степени соприкосновения поверхностей качения и поля допуска тел качения, которая позволяет выполнять расчет контактных напряжений для радиальных шариковых подшипников любого типоразмера при любых коэффициентах степени соприкосновения поверхностей качения.

Для цитирования

Белоусов Ю.В., Кириловский В.В., Рекач Ф.В. Исследование влияния степени соприкосновения поверхностей качения на контактные напряжения в шариковых радиальных подшипниках // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 213–223. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-213-223>



Investigation of the influence of the degree of contact of rolling surfaces on contact stresses in ball radial bearings

Yuriy V. Belousov^a , Valeriy V. Kirilovskiy^a , Fedor V. Rekach^b 

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

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

 juvbelousov@bmstu.ru

Article history

Received: June 26, 2022

Revised: August 27, 2022

Accepted: September 9, 2022

Keywords:

deep groove ball bearing, coefficient, degree, contact, rolling surfaces, contact stresses, bearing raceways

Abstract. The study is devoted to the determination of the coefficients of the degree of contact of rolling surfaces, considering the tolerance field of rolling bodies, as well as the influence of the coefficients of the degree of contact on the maximum contact stresses in ball radial bearings. A method has been developed for determining the maximum value of the coefficient of the degree of contact of rolling surfaces of ball radial bearings, taking into account the tolerance field of rolling bodies. It is established that the coefficient of the degree of contact of the rolling surfaces for each bearing size with a certain radius of the raceways is located in a range that depends on the limiting dimensions of the rolling elements. It is shown that the coefficient of the degree of contact of the rolling elements with the tracks of the outer ring, with the same auxiliary value, considering the sum and difference of the curvatures of the rolling surfaces, is greater than the inner one. Therefore, in order to reduce contact stresses on the outer ring of the bearing, the radius of its raceway can be made smaller than the inner one. A method has been developed for calculating the maximum contact stresses on the raceways of radial ball bearings, taking into account the coefficient of the degree of contact of rolling surfaces and the tolerance field of rolling bodies, which allows calculating contact stresses for radial ball bearings of any size at any coefficients of the degree of contact of rolling surfaces.

For citation

Belousov YuV, Kirilovskiy VV, Rekach FV. Investigation of the influence of the degree of contact of rolling surfaces on contact stresses in ball radial bearings. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):213–223. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-213-223>

Введение

Шариковые радиальные однорядные подшипники по ГОСТ 8338–75¹ являются одними из самых распространенных типов подшипников². Благодаря своей универсальности они имеют множество областей применения и производятся в широком диапазоне размеров. Их отличает простота конструкции, высокая надежность. Они не требуют особого технического обслуживания. По сравнению с другими типами под-

шипников шариковые радиальные подшипники работают с минимальными потерями на трение. Поэтому они способны работать с высокими скоростями вращения.

Шариковые радиальные подшипники имеют глубокие дорожки качения, радиус кривизны которых близок к размеру шариков. Это позволяет им воспринимать не только радиальные, но и осевые нагрузки.

При конструировании опор на подшипниках качения возникает необходимость в определении напряжений и деформаций в контакте шариков с дорожками качения. При этом необходимо учитывать, что приложенная к подшипнику нагрузка воспринимается небольшими участками дорожек качения подшипника. Поэтому напряжения в местах контакта с ними тел качения даже при сравнительно небольших нагрузках оказы-

¹ ГОСТ 8338–75. Межгосударственный стандарт. Подшипники шариковые радиальные однорядные. Основные размеры. Издание 01.09.2003 г. с изменением № 1, утвержденным в октябре 1983 г. (ИУС № 2–84). М.: Издательство стандартов, 2003.

² Носов В.Б., Карлухин И.М., Федотов Н.Н. Подшипниковые узлы современных машин и приборов: энциклопедический справочник. М.: Машиностроение, 1997. 640 с.

ваются весьма значительными. Нормальные напряжения в подшипниках качения в местах точечного и линейного контакта равны соответственно $\sigma = 5000$ МПа и $\sigma = 3500$ МПа³ [1–3]. Причем высокие напряжения сжатия сконцентрированы только в зоне контакта. Поэтому прочностные свойства подшипников качения зависят главным образом от напряжений, возникающих на поверхности контакта. Деформации в контакте поверхностей качения ввиду их высокой твердости сравнительно невелики.

Контактные напряжения и деформации в подшипниках качения зависят от нагрузки, упругих характеристик, размеров и формы контактирующих тел. Но стандарт не регламентирует внутреннюю конструкцию подшипников⁴. Проблеме оптимизации размеров дорожек и тел качения шариковых радиальных подшипников посвящен целый ряд технических решений и работ⁵ [4–6]. Однако подробное исследование данного вопроса в литературе отсутствует.

1. Определение максимального коэффициента степени соприкосновения и контактных напряжений на дорожках качения подшипников

Тело качения (шарик) может иметь с дорожкой качения внутреннего или наружного кольца ненагруженного подшипника точечный или линейный контакт. Точечный контакт – соприкосновение в одной точке. Линейный контакт – соприкосновение вдоль изогнутой линии, имеющей нулевую ширину. При линейном контакте

радиусы дорожек качения наружного и внутреннего колец равны радиусу тела качения. В этом случае поверхность дорожки качения совпадает с поверхностью желоба наружного и внутреннего колец, а контакт шарика с дорожкой качения происходит по всей длине ее образующей [7–9]. Это нежелательно ввиду большого момента трения в подшипнике. С увеличением момента трения повышается износ дорожек и тел качения. При этом ширина дорожки качения меньше диаметра шарика. Поэтому в местах сопряжения дорожек качения подшипников с поверхностью бортов, где обычно имеются участки с малыми радиусами закругления, будет иметь место концентрация нагрузки. Кроме того, из-за деформации самих шариков в этих местах возникают высокие контактные напряжения. Высокие контактные напряжения снижают работоспособность подшипников. Поэтому тело качения должно иметь с дорожкой качения внутреннего и наружного кольца ненагруженного подшипника точечный контакт.

В большинстве конструкций шариковых радиальных подшипников дорожки качения обоих колец довольно плотно прилегают к шарикам. Коэффициент, характеризующий степень соприкосновения поверхностей качения в контакте (рис. 1), зависит от геометрии и соотношения размеров этих поверхностей. Для шарикоподшипников коэффициенты степени соприкосновения⁶ [10; 11]

$$\Phi_B = \frac{D_w}{2r_B} = \frac{1}{2f_B}; \quad \Phi_H = \frac{D_w}{2r_H} = \frac{1}{2f_H}; \quad (1)$$

$$f_B = \frac{r_B}{D_w}; \quad f_H = \frac{r_H}{D_w}, \quad (2)$$

где f_B и f_H – вспомогательные величины коэффициента степени соприкосновения для внутреннего и наружного колец соответственно; D_w – диаметр шарика; r_B и r_H – радиусы дорожек качения внутреннего и наружного колец соответственно, расположенные в плоскости, перпендикулярной направлению вращения.

Под диаметром шарика D_w в формулах (1) и (2) понимается его номинальный диаметр. Поле допуска шарика не учитывается. Это может привести к достаточно серьезным ошибкам

³ Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 608 с.

⁴ Носов В.Б., Карпунин И.М., Федотов Н.Н. Подшипниковые узлы...; Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения...

⁵ Авторское свидетельство СССР № 285419, МПК F16C 19/02. Шарикоподшипник / С.В. Пинегин, А.В. Орлов, В.М. Матвеев; 29.10.1970, Бюл. № 33; Авторское свидетельство СССР № 385101 МПК F16C 33/30. Шарикоподшипник / А.В. Орлов, С.В. Пинегин, В.М. Матвеев; 29.05.1973, Бюл. № 25; Авторское свидетельство СССР № 368424 МПК F16C 33/58. Шарикоподшипник / В.М. Каневцов, В.Г. Устинов, Н.А. Спицын и др.; 26.01.1973, Бюл. № 9; Авторское свидетельство СССР № 1141237 МПК F16C 19/06. Подшипник качения / А.В. Королев; 23.02.1985, Бюл. № 7; Патент RU № 2157928 МПК F16C 19/00, F16C 19/02, F16C 33/38. Шарикоподшипник и сепараторы для него / В.В. Становской; 20.10.2000, Бюл. № 29; Патент RU № 2571484 МПК F16C 19/18, F16C 33/58. Шариковый подшипник / А.В. Королев, А.А. Королев; 20.12.2015, Бюл. № 35.

⁶ Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения...

при определении размеров дорожек качения, а также величины контактных напряжений.

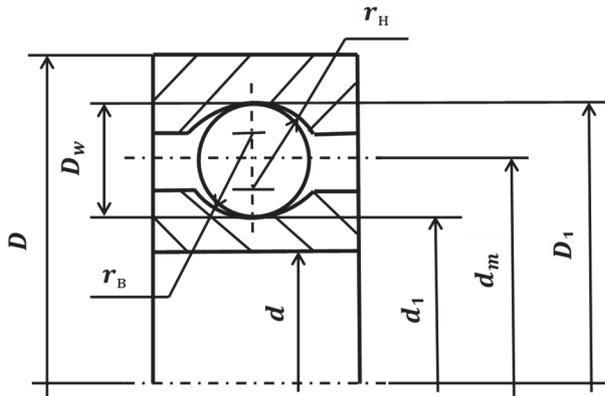


Рис. 1. Основные размеры поверхностей качения шарикового радиального подшипника
Figure 1. The main dimensions of the rolling surfaces of the radial ball bearing

При точечном контакте соприкосновение тел под нагрузкой происходит по эллиптической площадке. Характеристиками формы взаимодействующих тел являются их кривизны в точке контакта до приложения нагрузки, измеренные в двух главных взаимно перпендикулярных плоскостях, в которых кривизны приобретают экстремальные значения.

Если обозначить через R_1 и R_1^I главные радиусы кривизны шарика, через R_2 и R_2^I главные радиусы кривизны кольца подшипника, а через φ угол между нормальными плоскостями, содержащими радиусы кривизны R_1 и R_2 , то постоянные A и B , зависящие от величин главных кривизн соприкасающихся поверхностей, определяются из следующих уравнений [12]:

$$A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1^I} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2^I} \right); \quad (3)$$

$$B - A = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1^I} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2^I} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1^I} \right) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2^I} \right) \cos 2\varphi \right]^{1/2}. \quad (4)$$

Кривизна тела считается положительной, если радиус кривизны в рассматриваемой точке лежит внутри материала. Вспомогательная величина, учитывающая сумму и разность главных кривизн [13; 14]:

$$\cos \theta = \frac{B-A}{B+A}. \quad (5)$$

Максимальные контактные напряжения на дорожках качения подшипника определяются по формуле⁷

$$\sigma_{z_{\max}} = \frac{n_{\sigma}}{\pi} \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{\Sigma \rho}{\eta} \right)^2} P, \quad (6)$$

где n_{σ} – табличный коэффициент, соответствующий определенному значению $\cos \theta$; $\Sigma \rho$ – сумма главных кривизн контактирующих поверхностей; η – коэффициент, учитывающий упругие характеристики контактирующих тел (для стальных деталей при нормальной температуре $\eta = 8,7 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2/\text{Н}$)⁸; P – усилие, воспринимаемое наиболее нагруженным телом качения.

Выражение (6) можно представить следующим образом

$$\sigma_{z_{\max}} = 861,39 n_{\sigma} \sqrt{(\Sigma \rho)^2 P}. \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что $\cos \theta$ оказывает существенное влияние на величину контактных напряжений, так как определяет значение коэффициента n_{σ} .

В этой связи определенный интерес представляет определение максимального коэффициента степени соприкосновения тел качения с дорожками колец подшипника, при котором максимальные контактные напряжения на дорожках качения подшипника должны быть наименьшими. Наибольшее значение величины $\cos \theta$, до которой еще имеет место начальный точечный контакт шарика с дорожкой качения, составляет 0,9923⁹. Используя это значение, определим максимальный коэффициент степени соприкосновения поверхностей качения при точечном контакте, например, для подшипника № 216 по ГОСТ 8338–75, имеющего достаточно большие размеры колец и шариков. Внутренний диаметр подшипника $d = 80$ мм, его наружный диаметр $D = 140$ мм. Номинальный диаметр шариков $D_w = 19,05$ мм. Предельные отклоне-

⁷ Носов В.Б., Карпунин И.М., Федотов Н.Н. Подшипниковые узлы...; Перель Л.Я., Филатов А.А. Подшипники качения...

⁸ Носов В.Б., Карпунин И.М., Федотов Н.Н. Подшипниковые узлы...

⁹ Там же.

ния диаметра шариков для всех степеней точности составляют $\pm 0,15$ мм¹⁰. Диаметр окружности, проходящей через центры тел качения $d_m = 0,5(d + D) = 0,5(80 + 140) = 110$ мм. Диаметр дорожки качения внутреннего кольца подшипника $d_1 = d_m - D_w = 110 - 19,05 = 90,95$ мм. Диаметр дорожки качения наружного кольца $D_1 = d_m + D_w = 110 + 19,05 = 129,05$ мм.

Рассмотрим сначала наиболее нагруженное внутреннее кольцо подшипника. Для него вспомогательная величина, учитывающая сумму и разность главных кривизн шариков и дорожки качения

$$\cos \theta = \frac{\frac{2}{d_1} + \frac{1}{f_B D_w}}{\frac{4}{D_w} + \frac{2}{d_1} - \frac{1}{f_B D_w}}. \quad (8)$$

Из выражения (8) найдем вспомогательную величину коэффициента степени соприкосновения тел качения с внутренним кольцом подшипника

$$f_B = \frac{(1 + \cos \theta)d_1}{2[2 \cos \theta d_1 - D_w(1 - \cos \theta)]}. \quad (9)$$

Для подшипника № 216 получим

$$f_B = \frac{(1 + 0,9923)90,95}{2[2 \cdot 0,9923 \cdot 90,95 - 19,05(1 - 0,9923)]} = 0,5024.$$

При расчете по номинальному диаметру шариков, радиус дорожки качения внутреннего кольца данного подшипника $r_B = f_B D_w = 0,5024 \cdot 19,05 = 9,571$ мм. Это значение меньше максимального радиуса шарика, который равен

$$R_{w_{\max}} = \frac{D_{w_{\max}}}{2} = \frac{19,05 + 0,15}{2} = 9,6 \text{ мм}.$$

То есть шарики данного и близкого к нему радиуса на внутренней дорожке подшипника разместиться не смогут. Поэтому для размещения любых шариков на дорожке качения подшипника данного типоразмера ее радиус следует определять по максимальному значению диаметра шарика при условии, что допуск на размеры дорожки качения будет располагаться в тело кольца подшипника. Однако в массовом и крупносерийном производстве при комплектации

подшипников размеры дорожек качения не учитываются. Кольца и шарики каждого типоразмера после измерений диаметров D_1 , d_1 , D_w сортируют по группам. В каждой группе находятся детали, у которых эти размеры занимают определенную часть размерного поля. Отклонения размеров D_1 и d_1 в каждой группе обычно принимают равными 2 мкм, а D_w 1 мкм. Наружное, внутреннее кольцо и шарики из этих групп подбирают таким образом, чтобы обеспечить радиальные зазоры в подшипнике в пределах ± 6 мкм¹¹. Радиальный зазор является одной из основных эксплуатационных характеристик подшипников. С уменьшением радиального зазора в смонтированном подшипнике при установившейся рабочей температуре, шум и вибрации в нем снижаются, а его рабочие скорости повышаются. Рабочий зазор уменьшают, уменьшая начальный зазор в несмонтированном подшипнике и повышая класс точности его изготовления. В каждом подшипнике существует поле допусков радиальных зазоров [15; 16].

При подстановке в формулу (9) вместо среднего диаметра шарика D_w его максимальный диаметр $D_{w_{\max}} = 19,2$ мм, вспомогательная величина коэффициента соприкосновения f_B практически не изменится, поскольку она очень слабо зависит от конкретного значения диаметра шарика в пределах его поля допуска.

Вспомогательная величины коэффициента степени соприкосновения тел качения с внутренним кольцом подшипника попадает в диапазон: $f_B = f_{B_{\min}} \dots f_{B_{\max}}$, где $f_{B_{\min}} = 0,5024$ соответствует максимальному диаметру шарика $D_{w_{\max}}$, с учетом размещения всех шариков на дорожке качения, а $f_{B_{\max}}$ – минимальному диаметру шарика $D_{w_{\min}} = 19,05 - 0,15 = 18,9$ мм, то есть

$$f_{B_{\max}} = \frac{D_{w_{\max}} f_{B_{\min}}}{D_{w_{\min}}} = \frac{19,2 \cdot 0,5024}{18,9} = 0,5104. \quad (10)$$

Тогда $f_B = 0,5024 - 0,5104$, а коэффициент степени соприкосновения тел качения с внутренним кольцом подшипника $\Phi_B = 0,980 - 0,995$.

Для наружного кольца подшипника вспомогательная величина, учитывающая сумму и разность главных кривизн шариков и дорожки качения

¹⁰ Носов В.Б., Карпунин И.М., Федотов Н.Н. Подшипниковые узлы...

¹¹ Носов В.Б., Карпунин И.М., Федотов Н.Н. Подшипниковые узлы...

$$\cos \theta = \frac{\frac{1}{4} \frac{2}{f_H D_W \frac{D_1}{f_H D_W}}}{\frac{D_W}{D_1} \frac{1}{f_H D_W}} \quad (11)$$

Из выражения (11) найдем вспомогательную величину коэффициента степени соприкосновения шариков с дорожками качения наружного кольца подшипника

$$f_H = \frac{(1 + \cos \theta) D_1}{2[2 \cos \theta D_1 + D_W(1 - \cos \theta)]} \quad (12)$$

Для $\cos \theta = 0,9923$ вспомогательная величина коэффициента степени соприкосновения будет равна

$$f_H = \frac{(1 + 0,9923)129,05}{2[2 \cdot 0,9923 \cdot 129,05 + 19,05(1 - 0,9923)]} = 0,5017.$$

При расчете по номинальному диаметру шариков, радиус дорожки качения наружного кольца $r_H = f_H D_W = 0,5017 \cdot 19,05 = 9,56$ мм. Это значение также меньше максимального радиуса шарика, равного 9,6 мм. То есть шарики данного и близкого к нему радиуса на дорожке качения наружного кольца разместиться также не смогут. Вспомогательная величина коэффициента степени соприкосновения шариков с дорожками качения наружного кольца подшипника попадает в диапазон $f_H = f_{H_{\min}} \dots f_{H_{\max}}$, где $f_{H_{\min}}$ также соответствует максимальному диаметру шарика $D_{W_{\max}}$, а $f_{H_{\max}}$ – минимальному диаметру шарика $D_{W_{\min}}$, то есть

$$f_{H_{\max}} = \frac{D_{W_{\max}} f_{H_{\min}}}{D_{W_{\min}}} = \frac{19,2 \cdot 0,5017}{18,9} = 0,5097. \quad (13)$$

Окончательно получим, что вспомогательная величина коэффициента степени соприкосновения шариков с дорожками качения наружного кольца подшипника $f_H = 0,5017 - 0,5097$, а сам коэффициент степени соприкосновения $\Phi_H = 0,981 - 0,997$.

Коэффициент степени соприкосновения тел качения с дорожками качения наружного кольца подшипника немного больше, чем внутреннего при одной и той же вспомогательной величине, учитывающей сумму и разность главных кривизн контактирующих тел. Если составить соотношение коэффициентов степени соприкосновения наружного и внутреннего колец подшипника

$$\frac{\Phi_H}{\Phi_B} = \frac{f_B}{f_H} = \frac{2 \cos \theta d_1 D_1 + d_1 D_W (1 - \cos \theta)}{2 \cos \theta d_1 D_1 - D_1 D_W (1 - \cos \theta)}, \quad (14)$$

то легко убедиться в том, что оно больше единицы. Поэтому радиус дорожки качения наружного кольца подшипника может быть выполнен немного меньше, чем внутреннего. Хотя на практике, в ряде случаев, по другим соображениям, поступают наоборот¹² [17].

Наиболее часто радиусы дорожек качения внутреннего и наружного колец подшипника выполняются одинаковыми. В этом случае для определения их величины следует ориентироваться на наименьший из двух коэффициентов степени соприкосновения, то есть на коэффициент степени соприкосновения шариков с дорожками качения внутреннего кольца подшипника. При одинаковых радиусах дорожек качения внутреннего и наружного колец подшипника вспомогательная величина $\cos \theta$ для наружного кольца будет меньше, чем для внутреннего. Это приведет к увеличению коэффициента n_σ и, как следствие, к повышению контактных напряжений между телами качения и наружным кольцом подшипника.

Определим теперь контактные напряжения на дорожках качения колец подшипника для шариков предельных размеров. В качестве примера будем использовать все тот же подшипник № 216 по ГОСТ 8338–75. Радиус дорожки качения внутреннего и наружного колец подшипника

$$r_B = r_H = D_{W_{\max}} f_{B_{\min}} = 19,2 \cdot 0,5024 = 9,646 \text{ мм.} \quad (15)$$

Рассмотрим сначала контакт шариков с внутренним кольцом подшипника. Вспомогательная величина, учитывающая сумму и разность главных кривизн шариков максимального диаметра и дорожки качения внутреннего кольца подшипника:

$$\cos \theta = \frac{\frac{2}{d_1} + \frac{1}{r_B}}{\frac{4}{D_{W_{\max}}} + \frac{2}{d_1} \frac{1}{r_B}} = \frac{\frac{2}{90,95} + \frac{1}{9,646}}{\frac{4}{19,2} + \frac{2}{90,95} \frac{1}{9,646}} = 0,9922. \quad (16)$$

Эта величина практически совпадает с наибольшим табличным значением $\cos \theta = 0,9923$, до которой еще имеет место начальный точечный контакт шарика с дорожкой качения.

Для значения $\cos \theta = 0,9923$, $n_\sigma = 0,4267$. Сумма главных кривизн контактирующих тел

$$\Sigma \rho = \frac{4}{D_{W_{\max}}} + \frac{2}{d_1} - \frac{1}{r_B} = \frac{4}{19,2} + \frac{2}{90,95} - \frac{1}{9,646} = 0,1267 \text{ 1/мм.} \quad (17)$$

¹² Носов В.Б., Карпунин И.М., Федотов Н.Н. Подшипниковые узлы...

Максимальные контактные напряжения на дорожке качения внутреннего кольца подшипника для шариков максимального диаметра

$$\begin{aligned} \sigma_{z_{\max}(D_{w_{\max}})}^B &= 861,39 n_{\sigma}^3 \sqrt{(\Sigma\rho)^2 P} = \\ &= 861,39 \cdot 0,4267^3 \sqrt{0,1267^2 P} = 92,72 \sqrt[3]{P}. \end{aligned}$$

Вспомогательная величина, учитывающая сумму и разность главных кривизн шариков минимального диаметра и дорожки качения внутреннего кольца подшипника:

$$\cos \theta = \frac{\frac{2}{d_1} + \frac{1}{r_B}}{\frac{4}{D_{w_{\min}}} + \frac{2}{d_1} + \frac{1}{r_B}} = \frac{\frac{2}{90,95} + \frac{1}{9,646}}{\frac{4}{18,9} + \frac{2}{90,95} + \frac{1}{9,646}} = 0,9669. \quad (18)$$

В этом случае что $n_{\sigma} = 0,5653$. Сумма главных кривизн контактирующих тел

$$\Sigma\rho = \frac{4}{D_{w_{\min}}} + \frac{2}{d_1} - \frac{1}{r_B} = \frac{4}{18,9} + \frac{2}{90,95} - \frac{1}{9,646} = 0,13 \text{ 1/мм.} \quad (19)$$

Максимальные контактные напряжения на дорожке качения внутреннего кольца подшипника для шариков минимального диаметра

$$\begin{aligned} \sigma_{z_{\max}(D_{w_{\min}})}^B &= 861,39 n_{\sigma}^3 \sqrt{(\Sigma\rho)^2 P} = \\ &= 861,39 \cdot 0,5653^3 \sqrt{0,13^2 P} = 124,96 \sqrt[3]{P}. \end{aligned}$$

При контакте шариков с наружным кольцом того же подшипника № 216, радиус дорожки качения которого равен радиусу дорожки качения внутреннего кольца подшипника, вспомогательная величина, учитывающая сумму и разность главных кривизн шариков максимального диаметра и дорожки качения:

$$\cos \theta = \frac{\frac{1}{r_H} - \frac{2}{D_1}}{\frac{4}{D_{w_{\max}}} - \frac{2}{D_1} - \frac{1}{r_H}} = \frac{\frac{1}{9,646} - \frac{2}{129,05}}{\frac{4}{19,2} - \frac{2}{129,05} - \frac{1}{9,646}} = 0,9889. \quad (20)$$

Для нее $n_{\sigma} = 0,455$. Сумма главных кривизн контактирующих тел

$$\begin{aligned} \Sigma\rho &= \frac{4}{D_{w_{\max}}} - \frac{2}{D_1} - \frac{1}{r_H} = \\ &= \frac{4}{19,2} - \frac{2}{129,05} - \frac{1}{9,646} = 0,0892 \text{ 1/мм.} \quad (21) \end{aligned}$$

Максимальные контактные напряжения на дорожке качения наружного кольца подшипника для шариков максимального диаметра

$$\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\max}})}^H = 861,39 \cdot 0,455^3 \sqrt{0,0892^2 P} = 78,24 \sqrt[3]{P}.$$

Вспомогательная величина, учитывающая сумму и разность главных кривизн шариков минимального диаметра и дорожки качения наружного кольца подшипника:

$$\cos \theta = \frac{\frac{1}{r_H} - \frac{2}{D_1}}{\frac{4}{D_{w_{\min}}} - \frac{2}{D_1} - \frac{1}{r_H}} = \frac{\frac{1}{9,646} - \frac{2}{129,05}}{\frac{4}{18,9} - \frac{2}{129,05} - \frac{1}{9,646}} = 0,9535, \quad (22)$$

где $n_{\sigma} = 0,6043$.

Сумма главных кривизн контактирующих тел

$$\begin{aligned} \Sigma\rho &= \frac{4}{D_{w_{\min}}} - \frac{2}{D_1} - \frac{1}{r_H} = \\ &= \frac{4}{18,9} - \frac{2}{129,05} - \frac{1}{9,646} = 0,0925 \text{ 1/мм.} \quad (23) \end{aligned}$$

Максимальные контактные напряжения на дорожке качения наружного кольца подшипника для шариков минимального диаметра

$$\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\min}})}^H = 861,39 \cdot 0,6043^3 \sqrt{0,0925^2 P} = 106,47 \sqrt[3]{P}.$$

2. Сравнительный анализ максимальных контактных напряжений на дорожках качения колец подшипников

Обычно радиусы желобов наружного и внутреннего колец подшипников для шариков со средним диаметром $D_w > 4,763$ мм выполняются одинаковыми. Причем $r = r_B = r_H = 0,515 D_w$ ¹³. В этом случае для того же подшипника получим, что вспомогательная величина коэффициента степени соприкосновения тел качения с кольцами подшипника $f = 0,515 - 0,523$, а коэффициент степени соприкосновения $\Phi = 0,956 - 0,971$.

В соответствии с рекомендацией ИСО применяются также соотношения $r = 0,52 D_w$ и $r = 0,54 D_w$ ¹⁴. Тогда для того же подшипника № 216 в первом случае вспомогательная вели-

¹³ Носов В.Б., Карпунин И.М., Федотов Н.Н. Подшипниковые узлы...

¹⁴ Там же.

чина коэффициента степени соприкосновения тел качения с кольцами подшипника здесь $f = 0,520 - 0,528$ (коэффициент степени соприкосновения $\Phi = 0,947 - 0,961$), во втором случае $f = 0,540 - 0,549$ (коэффициент степени соприкосновения $\Phi = 0,911 - 0,926$).

Используя разработанную методику, определим контактные напряжения на дорожках качения подшипника № 216 с данными коэффициентами степени соприкосновения для шариков максимального и минимального диаметра. Результаты расчетов представим в виде табл. 1, в которую также занесем результаты предыдущих расчетов.

Сравним контактные напряжения на дорожках качения подшипника между собой. Результаты расчетов также представим в виде таблицы (табл. 2).

На рис. 2 и 3 приведены графические зависимости относительной величины максимальных контактных напряжений на дорожках качения колец подшипника № 216 по ГОСТ 8338–75 от максимальной (контакт дорожек качения с шариками максимального диаметра) и минимальной (контакт дорожек качения с шариками минимального диаметра) величины коэффициента степени соприкосновения. На этих рисунках сплошная линия соответствует контактным напряжениям на внутреннем кольце подшипника, а пунктирная – на внешнем.

На рис. 4 и 5 приведены графические зависимости соотношения максимальных контактных напряжений на дорожках качения внутреннего и наружного колец подшипника № 216 от максимальной (контакт дорожек качения с шариками максимального диаметра) и минимальной (контакт дорожек качения с шариками минимального диаметра) величины коэффициента степени соприкосновения

Таблица 1 / Table 1

Максимальные контактные напряжения на дорожках качения колец подшипника № 216 по ГОСТ 8338–75
Maximum contact stresses on the raceways of the bearing rings No. 216 according to GOST 8338–75

Φ	$\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\max}})}^B$	$\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\min}})}^B$	$\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\max}})}^H$	$\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\min}})}^H$
0,980–0,995	$92,72 \sqrt[3]{P}$	$124,96 \sqrt[3]{P}$	$78,24 \sqrt[3]{P}$	$106,47 \sqrt[3]{P}$
0,956–0,971	$133,32 \sqrt[3]{P}$	$146,91 \sqrt[3]{P}$	$113,42 \sqrt[3]{P}$	$125,54 \sqrt[3]{P}$
0,947–0,961	$141,33 \sqrt[3]{P}$	$152,98 \sqrt[3]{P}$	$120,36 \sqrt[3]{P}$	$130,81 \sqrt[3]{P}$
0,911–0,926	$162,60 \sqrt[3]{P}$	$170,78 \sqrt[3]{P}$	$139,18 \sqrt[3]{P}$	$146,72 \sqrt[3]{P}$

Таблица 2 / Table 2

Соотношение максимальных контактных напряжений на дорожках качения колец подшипника № 216 по ГОСТ 8338–75
The ratio of maximum contact stresses on the raceways of bearing rings No. 216 according to GOST 8338–75

Φ	$\frac{\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\min}})}^B}{\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\max}})}^B}$	$\frac{\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\min}})}^H}{\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\max}})}^H}$	$\frac{\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\max}})}^B}{\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\min}})}^B}$	$\frac{\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\min}})}^H}{\sigma_{z_{\max}(D_{w_{\min}})}^H}$
0,980–0,995	1,348	1,361	1,185	1,174
0,956–0,971	1,102	1,107	1,175	1,170
0,947–0,962	1,099	1,087	1,174	1,169
0,911–0,926	1,050	1,059	1,168	1,164

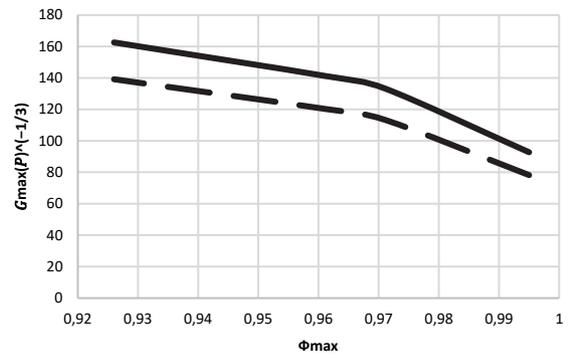


Рис. 2. Зависимость относительной величины максимальных контактных напряжений на дорожках качения колец подшипника № 216 по ГОСТ 8338–75 от максимальной величины коэффициента степени соприкосновения

Figure 2. Dependence of the relative magnitude of the maximum contact stresses on the raceways of bearing rings No. 216 according to GOST 8338–75 on the maximum value of the coefficient of degree of contact

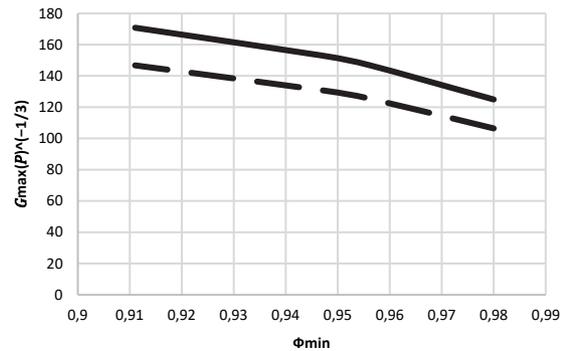


Рис. 3. Зависимость относительной величины максимальных контактных напряжений на дорожках качения колец подшипника № 216 по ГОСТ 8338–75 от минимальной величины коэффициента степени соприкосновения

Figure 3. Dependence of the relative magnitude of the maximum contact stresses on the raceways of bearing rings No. 216 according to GOST 8338–75 on the minimum value of the coefficient of degree of contact

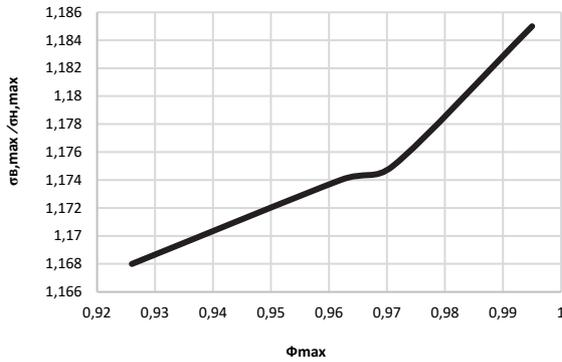


Рис. 4. Зависимость соотношения максимальных контактных напряжений на дорожках качения колец подшипника № 216 по ГОСТ 8338–75 от максимальной величины коэффициента степени соприкосновения

Figure 4. Dependence of the ratio of maximum contact stresses on the raceways of bearing rings No. 216 according to GOST 8338–75 on the maximum value of the coefficient of degree of contact

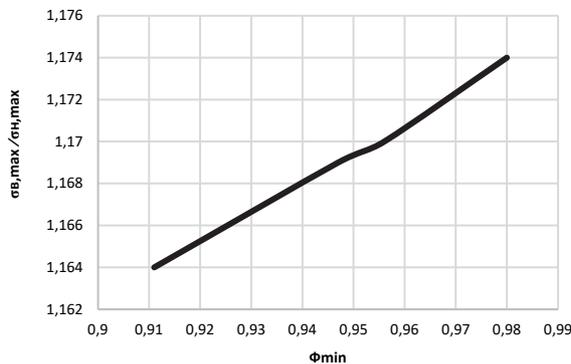


Рис. 5. Зависимость соотношения максимальных контактных напряжений на дорожках качения колец подшипника № 216 по ГОСТ 8338–75 от минимальной величины коэффициента степени соприкосновения

Figure 5. Dependence of the ratio of maximum contact stresses on the raceways of bearing rings No. 216 according to GOST 8338–75 on the minimum value of the coefficient of degree of contact

Согласно выполненному анализу, можно утверждать, что при уменьшении коэффициента степени соприкосновения поверхностей качения подшипника, разница между максимальными контактными напряжениями на кольцах подшипника для экстремальных по размерам шариков уменьшается. В то же время сама величина максимальных контактных напряжений увеличивается. При этом в любом случае контактные напряжения на внутреннем кольце подшипника больше, чем на наружном. Соотношения между максимальными контактными напряжениями на внутреннем и наружном кольцах подшипника для шариков одного размера слабо зависят от коэффициента степени соприкосновения и составляют в среднем 1,177 для шариков максимально-

го диаметра (рис. 4, табл. 2, столбец 4) и 1,17 для шариков минимального диаметра (рис. 5, табл. 2, столбец 5). То есть максимальные контактные напряжения на внутреннем кольце подшипника примерно на 17 % больше, чем на наружном.

Для шариков разного размера (табл. 2, столбцы 2 и 3) при максимальном коэффициенте степени соприкосновения ($\Phi = 0,980-0,995$) максимальные контактные напряжения на внутреннем кольце подшипника значительно больше (в среднем на 35,5 %), чем на наружном. При остальных коэффициентах степени соприкосновения разница между максимальными контактными напряжениями на внутреннем и наружном кольцах подшипника невелика и с уменьшением коэффициента степени соприкосновения изменяется незначительно.

На рис. 2 для обеих кривых заметна точка перегиба, ниже которой при росте коэффициента степени соприкосновения максимальные контактные напряжения снижаются быстрее. Эта точка примерно соответствует значению $\Phi_{\max} = 0,97$. На рис. 3 такой точкой примерно является $\Phi_{\min} = 0,95$. Очевидно, что данные точки определяют крайнее нижнее значение коэффициента степени соприкосновения. Поэтому желательно, чтобы он не выходил за эти пределы. То есть минимальное значение коэффициента степени соприкосновения должно быть не ниже значения $\Phi = 0,95-0,97$.

Очевидно, что данная тенденция справедлива для шариковых радиальных подшипников практически любого типоразмера. Разработанная методика позволяет выполнять расчет контактных напряжений для радиальных шариковых подшипников любого типоразмера при любых коэффициентах степени соприкосновения поверхностей качения и проводить на этой основе оптимизацию размеров дорожек качения указанных подшипников.

Заключение

Разработана методика определения максимальной величины коэффициента степени соприкосновения поверхностей качения шариковых радиальных подшипников с учетом поля допуска тел качения. Установлено, что коэффициент степени соприкосновения поверхностей качения для каждого типоразмера подшипника с определенным радиусом дорожек качения располагается в диапазоне, который зависит от предельных размеров тел качения. Показано, что коэффициент степени соприкосновения тел качения с до-

рожками наружного кольца, при одинаковой вспомогательной величине, учитывающей сумму и разность кривизн поверхностей качения, больше, чем внутреннего. Поэтому для снижения контактных напряжений на наружном кольце подшипника радиус его дорожки качения может быть выполнен меньше, чем внутреннего.

Разработана методика расчета максимальных контактных напряжений на дорожках качения шариковых радиальных подшипников с учетом коэффициента степени соприкосновения поверхностей качения и поля допуска тел качения. Данная методика позволяет выполнять расчет контактных напряжений для радиальных шариковых подшипников любого типоразмера при любых коэффициентах степени соприкосновения поверхностей качения и проводить на этой основе оптимизацию размеров дорожек качения указанных подшипников.

В качестве примера определены контактные напряжения на дорожках качения подшипника № 216 по ГОСТ 8338–75, имеющего достаточно большие размеры колец и шариков, для различных коэффициентов степени соприкосновения поверхностей и размеров тел качения. Выполнено сравнение максимальных контактных напряжений для наружного и внутреннего колец данного подшипника.

Список литературы / References

1. Vijay A, Sadeghi F. A continuum damage mechanics framework for modeling the effect of crystalline anisotropy on rolling contact fatigue. *Tribology International*. 2019;140:105845. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105845>
2. Paulson NR, Evans NE, Bomidi JAR, Sadeghi F, Evans RD, Mistry KK. A finite element model for rolling contact fatigue of refurbished bearings. *Tribology International*. 2015;85:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.12.006>
3. Jiaxian C, Wentao M, Yuejian Ch. Transferable health indicator for rolling bearings: a new solution of cross-working condition monitoring of degradation process. *2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling*. IEEE; 2020. p. 1–6. <https://doi.org/10.1109/APARM49247.2020.9209439>
4. Kirilovsky VV, Belousov YuV. Theoretical substantiation of new features of rolling bearings operation under combined loading conditions. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2021;22(2):184–195. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-2-184-195>
- Кириловский В.В., Белоусов Ю.В. Теоретическое обоснование новых особенностей работы подшипников качения в условиях комбинированного нагруже-

ния // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 184–195. <https://doi.org/10.22363.2312-8143-2021-22-2-184-195>

5. Kirilovsky VV, Belousov YuV. Experimental verification of new features of bearing operation under combined loading conditions. *Construction Mechanics of Engineering Structures and Structures*. 2021;17(3):278–287. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-278-287>

Кириловский В.В., Белоусов Ю.В. Экспериментальная проверка новых особенностей работы подшипников в условиях комбинированного нагружения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 278–287. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-278-287>

6. Polubaryev IN, Dvoryaninov IN, Saliev ER. Experimental verification of a new approach to determining the loads acting on ball radia. *Forum Molodyh Uchenykh*. 2017;(9):591–600. (In Russ.)

Полубарьев И.Н., Дворянинов И.Н., Салиев Е.Р. Экспериментальная проверка нового подхода к определению нагрузок, действующих на шариковые радиальные однорядные подшипники // Форум молодых ученых. 2017. № 9 (13). С. 591–600.

7. Golmohammadi Z, Sadeghi F. A 3D finite element model for investigating effects of refurbishing on rolling contact fatigue. *Tribology Transactions*. 2020;63(2):251–264. <https://doi.org/10.1080/10402004.2019.1684606>

8. Weinzapfel N, Sadeghi F, Bakolas V. A 3D finite element model for investigating effects of material microstructure on rolling contact fatigue. *Tribology and Lubrication Technology*. 2011;67(1):17–19.

9. Abdullah MU, Khan ZA, Kruhoeffer W, Blass T. A 3D finite element model of rolling contact fatigue for evolved material response and residual stress estimation. *Tribology Letters*. 2020;68:122. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01359-w>

10. Bogdański S, Trajer MA. Dimensionless multi-size finite element model of a rolling contact fatigue crack. *Wear*. 2005;258(7–8):1265–1272. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.036>

11. Lin H, Wu F, He G. Rolling bearing fault diagnosis using impulse feature enhancement and nonconvex regularization. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020;142:106790. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106790>

12. Timoshenko SP, Goodyear J. *Theory of elasticity*. Moscow: Nauka Publ.; 1975. (In Russ.)

Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.

13. Wang H, Du W. A new K-means singular value decomposition method based on self-adaptive matching pursuit and its application in fault diagnosis of rolling bearing weak fault. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2020;16. <https://doi.org/10.1177/1550147720920781>

14. Gaikwad JA, Gholap YB, Kulkarni JV. Bearing fault detection using Thomson's multitaper periodogram.

2018 *Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*. IEEE; 2018. p. 1135–1139. <https://doi.org/10.1109/ICCONS.2018.8663183>

15. Smith WA, Randall RB. Diagnostics using the case western reserve university data: a benchmark study. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015;64–65: 100–131. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.04.021>

16. Gao Z, Lin J, Wang X, Xu X. Bearing fault detection based on empirical wavelet transform and correlated

kurtosis by acoustic emission. *Materials*. 2017;10(6):571. <https://doi.org/10.3390/ma10060571>

17. Orlov AV. Increasing the static load capacity of ball bearing. *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*. 2009;(5):67–70. (In Russ.)

Орлов А.В. Повышение статической грузоподъемности шарикоподшипников // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 5. С. 67–70.

Сведения об авторах

Белоусов Юрий Вениаминович, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; ORCID: 0000-0002-7591-8313, Scopus Author ID: 57192978540, eLIBRARY SPIN-код: 7102-6966; belou.80@mail.ru

Кириловский Валерий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; ORCID: 0000-0002-2989-500X, eLIBRARY SPIN-код: 4512-5571; proekt.33@yandex.ru

Рекач Федор Владимирович, доцент департамента строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8584-6755, Scopus Author ID: 57192991693, eLIBRARY SPIN-код: 8591-7547; rekfedor@yandex.ru

About the authors

Yuriy V. Belousov, PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Bases of Machine Designing, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-7591-8313, Scopus Author ID: 57192978540, eLIBRARY SPIN-code: 7102-6966; belou.80@mail.ru

Valeriy V. Kirilovskiy, PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Bases of Machine Designing, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2989-500X, eLIBRARY SPIN-code: 4512-5571; proekt.33@yandex.ru

Fedor V. Rekach, PhD (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Construction, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8584-6755, Scopus Author ID: 57192991693, eLIBRARY SPIN-code: 8591-7547; rekfedor@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-224-231
УДК 553.04

Научная статья / Research article

Вероятностная оценка проницаемости отложений верхней части Тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района

П.Н. Страхов , А.А. Маркелова  

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
 markelova-aa@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 мая 2022 г.
Доработана: 2 сентября 2022 г.
Принята к публикации: 5 сентября 2022 г.

Ключевые слова:

пористость, проницаемость, коллектор, вероятность, генератор случайных чисел, функция, отложения, породы

Аннотация. Работа посвящена проблеме повышения надежности расчета куба проницаемости при построении трехмерной геологической модели. Общераспространенный способ механического переноса зависимостей между пористостью и проницаемостью, полученных на основании аппроксимации данных исследования керна, дает слишком расплывчатый результат, так как не учитываются ни различия размеров ячеек и образцов, ни большой разброс значений анализируемых зависимостей. Вместо этого предлагается с помощью стохастических методов для каждой элементарной ячейки рассчитывать гистограммы проницаемости. Вначале анализируются результаты определения петрофизических свойств, выполненного в лабораторных условиях. Для пород с близкими значениями пористости рассчитываются вероятности встречаемости пород, проницаемость которых превышает ряд пороговых значений. Затем для каждой пороговой величины проницаемости определяются эмпирические зависимости вероятности превышения данного значения от пористости. На следующем этапе осуществляется адаптация полученных результатов для масштаба ячейки. Используется метод Монте-Карло. Каждая ячейка представляется в качестве совокупности большого количества пород, размеры которых близки аналогичным параметрам образцов. Каждой виртуальной породе с помощью генератора случайных чисел задается пористость с таким расчетом, что сохраняется среднее значение пористости ячейки. Для каждой условной породы рассчитываются вероятности превышения соответствующих пороговых значений проницаемости. На основании куба пористости для каждой ячейки автоматически рассчитывается вероятность существования всех диапазонов проницаемости. Приводятся примеры реализации предлагаемой методики при изучении терригенных отложений тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района.

Для цитирования

Страхов П.Н., Маркелова А.А. Вероятностная оценка проницаемости отложений верхней части Тюменской свиты Шаимского нефтегазоносного района // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 224–231. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-224-231>



Probabilistic assessment of the permeability of the deposits of the upper part of the Tyumen suite of the Shaim oil and gas region

Pavel N. Strakhov , Anastasia A. Markelova  

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

 markelova-aa@rudn.ru

Article history

Received: May 17, 2022

Revised: September 2, 2022

Accepted: September 5, 2022

Keywords:

porosity, permeability, reservoir, probability, random number generator, function, deposits, rocks

Abstract. The work is devoted to the problem of increasing the reliability of the calculation of the permeability cube in the construction of a three-dimensional geological model. The common method of mechanically transferring the relationship between porosity and permeability, obtained on the basis of the approximation of the results of the study of the core, gives too vague result since neither the differences in the sizes of cells and samples, nor the large scatter of the values of the analyzed dependencies are taken into account. Instead, it is proposed to use stochastic methods to calculate permeability histograms for each elementary cell. First, the analysis of the results of determining the petrophysical properties performed in the laboratory is carried out. For rocks with similar porosity values, the probability of occurrence of rocks whose permeability exceeds a number of threshold values is calculated. Then, for each threshold value of permeability, empirical dependences of the probability of exceeding a given value on porosity are determined. At the next stage, the obtained results are adapted to the cell scale. The Monte Carlo method is used. Each cell is represented as a set of a large number of rocks, the sizes of which are close to those of the samples. Each virtual rock is assigned a porosity using a random number generator in such a way that the average value of the cell porosity is stored. For each conditional rock, the probabilities of exceeding the corresponding permeability thresholds are calculated. Based on the porosity cube for each cell, the probability of existence of all permeability ranges is automatically calculated for each cell. The authors provide examples of the implementation of the proposed methodology in the study of terrigenous deposits of the Tyumen suite of the Shaim oil and gas region.

For citation

Strakhov PN, Markelova AA. Probabilistic assessment of the permeability of the deposits of the upper part of the Tyumen suite of the Shaim oil and gas region. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):224–231. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-224-231>

Введение

Перспективы нефтегазоносности Шаимского района в настоящее время во многом связаны с освоением терригенных отложений тюменской свиты [1]. Исследование фильтрационных свойств пород продуктивных горизонтов остается актуальным и при проведении поисково-разведочных работ, и, безусловно, при проектировании систем разработки месторождений углеводородов. Ответ на данный вопрос во многом определяет объемы финансирования, а в ряде случаев, и саму возможность освоения выбранного нефтегазоносного объекта, так как данный параметр определяет первоначальные дебиты искомого сырья из продуктивных отложений. Основная проблема заключа-

ется в определении проницаемости исследуемых отложений. Значимость данной проблемы наиболее ярко проявляется при построении цифровой геологической модели [2–4].

1. Оценка проницаемости на основе исследований данных по лабораторным исследованиям керна

Основная проблема заключается в определении проницаемости исследуемых отложений. В настоящее время существуют только два сравнительно надежных способа корректного изучения данного параметра: по результатам гидродинамических исследований скважин и анализ керна в лабораторных условиях [5]. В первом случае предусмат-

ривается ограниченное количество объектов изучения в первую очередь по экономическим причинам. Во-втором, возникают сложности оценки фильтрационных свойств пластов. При изучении месторождений имеется возможность получить достаточно надежную информацию только с помощью определения параметра пористости слоев в результате интерпретации промыслово-геофизических методов. Информацию о фильтрационных свойствах слоев в подавляющем большинстве случаев получают на основании устанавливаемых эмпирических связей между пористостью и проницаемостью, измеренных по данным

керна. В последующем осуществляется простой пересчет кривых пористости по данным промысловой геофизики с помощью соответствующих формул. При этом следует учитывать, что характер соотношений данных параметров предопределяет появление существенных ошибок. Как правило, фиксируется большой разброс значений, что предопределяет появление значительной погрешности в искомом результате. Это хорошо иллюстрирует график, отражающий особенности связи между пористостью и проницаемостью образцов керна Даниловского месторождения (рис. 1), которые представлены терригенными породами.

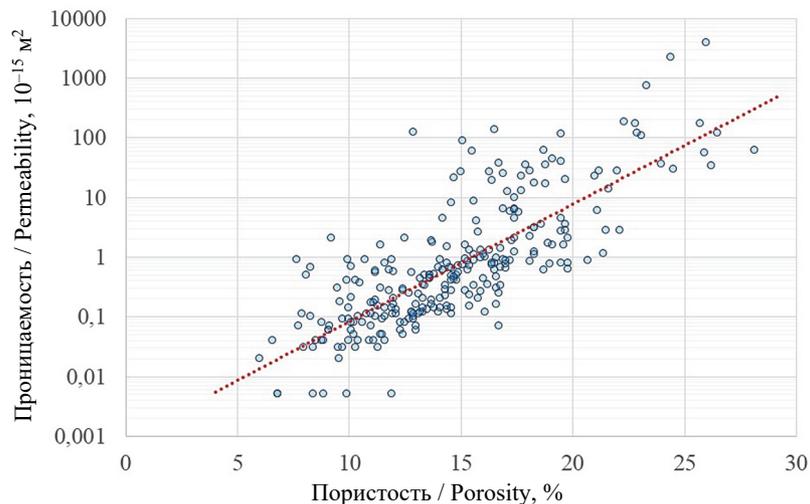


Рис. 1. Соотношение пористости и проницаемости пород тюменской свиты Даниловского месторождения
Figure 1. The ratio of porosity and permeability of rocks of the Tyumen formation of the Danilovsky deposit

Фиксируется слишком большой разброс значений, чтобы можно было говорить о достоверности прогноза фильтрационных свойств по общепринятой методике. Отклонения от данного тренда практически составляют плюс-минус порядок значений проницаемости. Тем не менее хорошо прослеживается общая тенденция улучшения фильтрационных свойств образцов по мере увеличения их пористости. Приведенная информация однозначно указывает на необходимость осуществлять комплексирование детерминистических и вероятностных методов [6; 7] при обработке результатов лабораторных исследований керна.

2. Оценка проницаемости на основе комплексирования вероятностных и детерминированных методов

В ходе проведения целевых исследований за основу была принята классификационная схема коллекторов, предложенная А.А. Ханниным (1969) [8; 9].

В пределах Шаимского района Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции выделяются 4 класса коллектора: 3 (проницаемость от 100 до 500 10^{-15} м^2), 4 (от 10 до 100 10^{-15} м^2), 5 (от 1 до 10 10^{-15} м^2) и 6 (от 0,1 до 1 10^{-15} м^2). Вначале рассчитывалась вероятность превышения определенного порога проницаемости ($0,1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ для группы коллекторов 1–6 классов; $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ – 1–5 классов; $10 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ – для 1–4 классов и $100 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ – для 1–3 классов), которая с квадратичным коэффициентом корреляции 0,92–0,97 описывалась эмпирической формулой

$$P_K^K = 1 - \exp[-\exp(A \times K_n^K - B)], \quad (1)$$

где P_K^K – вероятность отнесения образца к коллекторам, д. ед.; K_n^K – пористость, определенная по керну, д. ед.; A, B – коэффициенты пропорциональности.

Корректное использование формулы (1) возможно только при анализе свойств образцов.

При изучении строения пластов эту формулу не целесообразно рекомендовать к использованию в чистом виде. Основная причина – изменение масштаба исследований, что, как правило, влечет за собой появление ряда побочных эффектов [10; 11]. Пласт практически всегда имеет достаточно более сложное строение, чем единичный образец. В его составе отмечается изменения фильтрационно-емкостных свойств как по площади, так и по разрезу. Также следует учитывать, что по материалам промыслово-геофизических исследований мы можем определять только среднее значение пористости. Соответственно фильтрационные свойства отложений также остаются непостоянными [12]. Поэтому предлагается для адаптации полученных зависимостей при изучении продуктивных отложений более высокого иерархического уровня использовать метод Монте-Карло.

В данном случае предлагается представить пласт как совокупность бесконечно большого количества образцов, пористость которых будет задаваться с помощью генератора случайных чисел. При этом будет соблюдаться ряд условий. Во-первых, средняя пористость виртуальной выборки образцов будет равняться значению данного параметра, принятого для соответствующего слоя или пласта. Во-вторых, генерация величин емкостных свойств условных пород будет осуществляться в соответствии с выбранным законом распределения (нормальный, логнормальный и т. д.). В-третьих, задается интервал изменения искомого параметра. В данном примере был выбран логнормальный закон распределения и среднеквадратическое отклонение составило половину значения соответствующего значения пористости. Затем следует для каждого виртуального образца определить по формуле (1) вероятность преодоления каждого из обозначенных порогового барьера проницаемости и рассчитать ее среднее значение для каждой условной выборки с соответствующей средней пористостью, после аппроксимировать связь между данным показателем и пористостью с помощью формулы

$$P_K^{\Pi} = 1 - \exp[-\exp(A_1 K_{\text{пор}}^2 + B_1 K_{\text{пор}} + C)], \quad (2)$$

где P_K^{Π} – вероятность существования проницаемости пласта не менее порогового значения для соответствующей совокупности классов, д. ед. [11]; $K_{\text{пор}}$ – пористость пласта, д. ед.; A_1, B_1, C – коэффициенты пропорциональности

Следует отметить, что рассматриваемые функции – формулы (1) и (2) – характеризуется хорошо выраженной асимптотикой в области низких и высоких значений. Для наименьших величин пористости возможность существования коллектора практически приближена к 0, и, наоборот, при очень больших значениях пористости рассматриваемая вероятность стремится к 1. Кроме этого представляется логичным то обстоятельство, что чем больше порог фильтрационных свойств, тем меньше вероятность существования соответствующей группы коллекторов [11; 13; 14].

3. Методология вероятностной оценки проницаемости терригенных пород

Для отложений тюменской свиты по ряду месторождений, по которым имелось достаточно большое количество определений по ядру коллекторских свойств, были построены искомые зависимости, адаптированные к масштабу пласта (формула (2), рис. 2). В последующем полученные эмпирические функции были использованы для определения вероятностей существования каждого класса коллектора для всех месторождений исследуемой территории:

$$P_{K_{\text{пор}i}}^{N_{\text{кл}}} = P_{K_{\text{пор}i}}^{1-N_{\text{кл}}} - P_{K_{\text{пор}i}}^{1-(N-1)_{\text{кл}}}, \quad (3)$$

где $K_{\text{пор}i}$ – вероятность формирования коллектора определенного класса; $P_{K_{\text{пор}i}}^{N_{\text{кл}}}$ – вероятность существования коллектора N -го класса в i -й ячейке геологической модели, д. ед.; $P_{K_{\text{пор}i}}^{1-N_{\text{кл}}}$ – вероятность существования коллекторов $1 - N$ классов в i -й ячейке геологической модели, д. ед.; $P_{K_{\text{пор}i}}^{1-(N-1)_{\text{кл}}}$ – вероятность существования коллекторов $1 - (N - 1)$ классов в i -й ячейке геологической модели, д. ед.

Для каждого класса коллектора были построены схемы вероятности обнаружения отложений с соответствующими фильтрационными свойствами (рис. 3). В целом отмечается тенденция ухудшения коллекторов в восточном направлении, соответствующем последовательному погружению продуктивных отложений. По всей видимости, это обусловлено и характером изменения условий осадконакопления, и особенностями развития постседиментационных преобразований, которым геологам следует уделить повышенное внимание [15; 16].

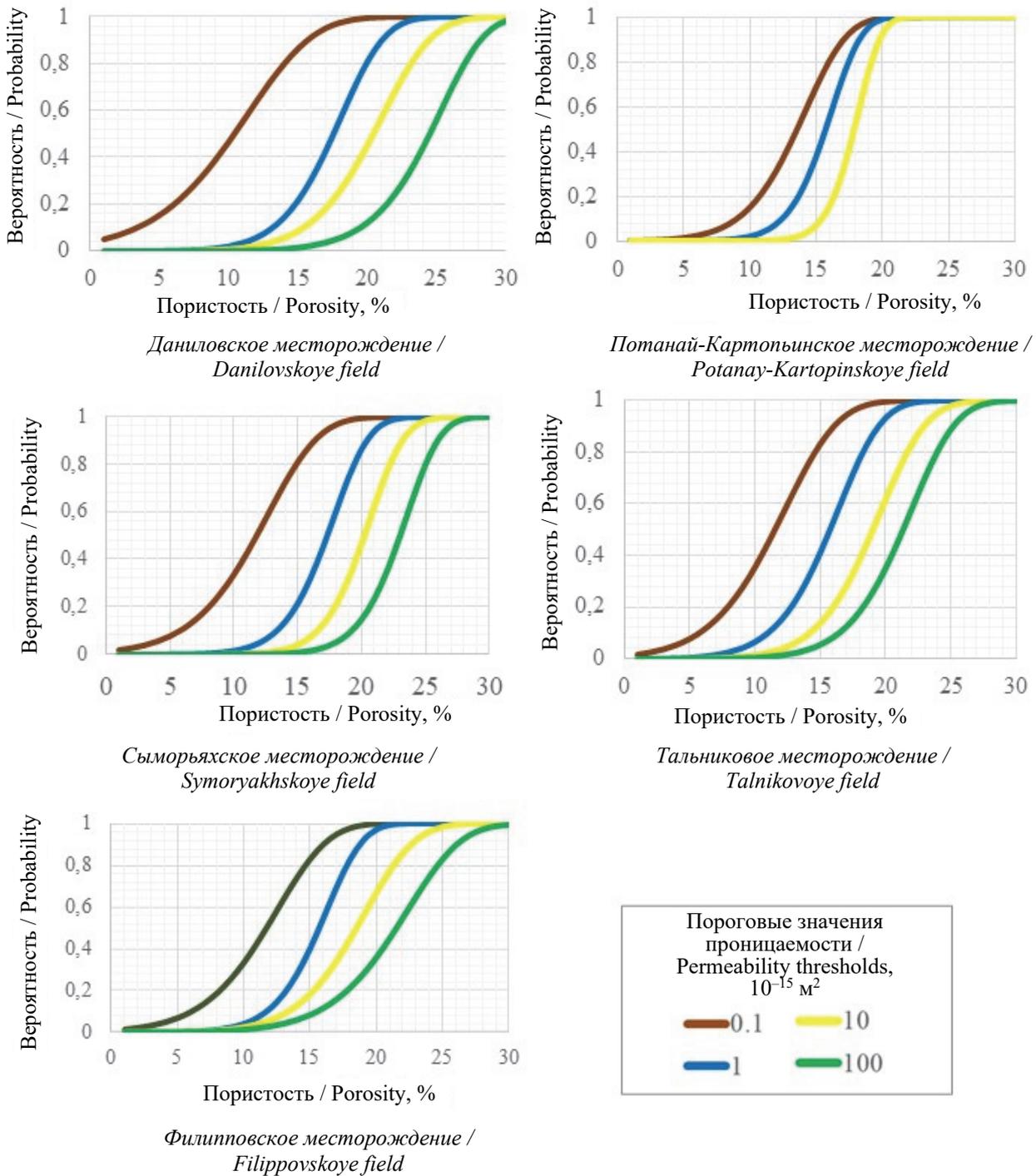


Рис. 2. Пример графиков вероятностей превышения ряда пороговых значений проницаемости продуктивных отложений среднеюрского отдела Шаимского района
Figure 2. Probabilities of exceeding a number of threshold values of permeability of productive sediments of the Middle Jurassic department

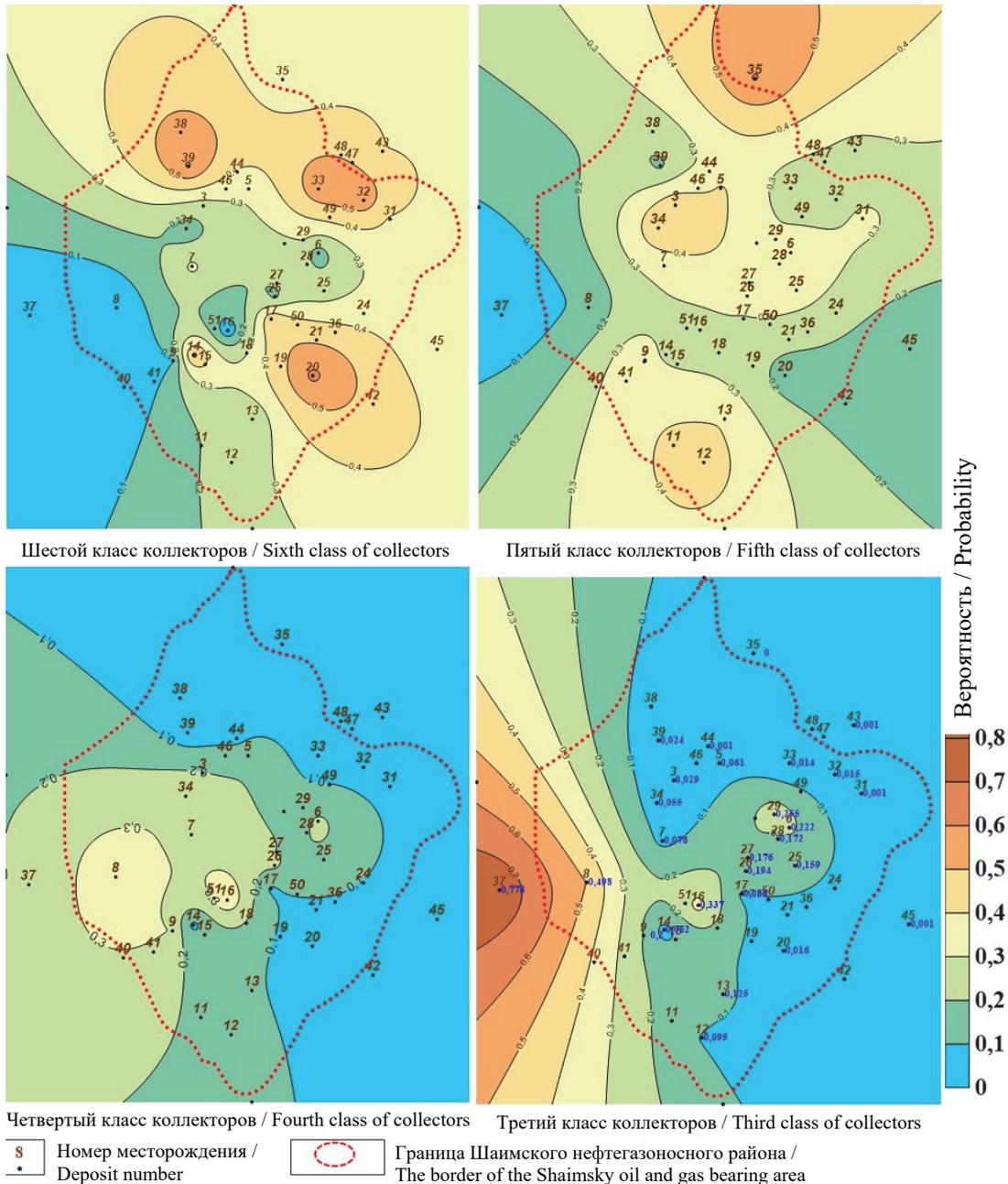


Рис. 3. Принципиальная схемы вероятности обнаружения коллекторов различных классов проницаемости отложений тюменской свиты среднеюрского отдела:

- 1 – Шушминское; 2 – Сыморьяхское; 3 – Тальниковое; 4 – Даниловское; 5 – Среднекондинское; 6 – Хултурское; 7 – Мулымьинское; 8 – Трехозерное; 9 – Мортмыа-Тетеревское; 10 – Узбекское; 11 – Андреевское; 12 – Славинское; 13 – Убинское; 14 – Среднемулымьинское; 15 – Полюемское; 16 – Толумское; 17 – Западно-Семивидовское; 18 – Каюмовское; 19 – Лумутинское; 20 – Мансингьянское; 21 – Филипповское; 22 – Урайское; 23 – Лазаревское; 24 – Потанайское (Потанай-Картопийское); 25 – Пайтыхское; 26 – Ловинское; 27 – Северо-Даниловское; 28 – Западно-Тугровское; 29 – Северо-Семивидовское; 30 – Иусское; 31 – Верхнекондинское; 32 – Супринское; 33 – Тангинское; 34 – Экутальское; 35 – Восточно-Толумское; 36 – Яхлинское; 37 – Малопотанайское; 38 – Онтохское; 39 – Малошущминское; 40 – Новомостовское; 41 – Западно-Новомостовское; 42 – Малокартопийское; 43 – Южно-Валовое; 44 – Западно-Славинское

Figure 3. Schematic diagram of the probability of detection of reservoirs of various classes of permeability of deposits of the Tyumen formation of the Middle Jurassic department:

- 1 – Shushminskoye; 2 – Symoryakhskoye; 3 – Talnikovoye; 4 – Danilovskoye; 5 – Srednekondinskoye; 6 – Khulturskoye; 7 – Mulyumyinskoye; 8 – Trekhozerno; 9 – Morytmya-Teterevskoye; 10 – Uzbek; 11 – Andreevskoye; 12 – Slavinskoye; 13 – Ubinskoye; 14 – Srednemulyumyinskoye; 15 – Polemskoye; 16 – Tolumskoye; 17 – Zapadno-Semividovskoye; 18 – Kayumovskoye; 19 – Lumutinskoye; 20 – Mansingyanskoye; 21 – Filippovskoye; 22 – Urayskoye; 23 – Lazarevskoye; 24 – Potanayskoye (Potanay-Kartopinskoye); 25 – Paytykhsokoye; 26 – Lovinskoye; 27 – Severo-Danilovskoye; 28 – Zapadno-Tugrovskoye; 29 – Severo-Semividovskoye; 30 – Iusskoye; 31 – Verkhnekondinskoye; 32 – Suprinskoye; 33 – Tanginskoye; 34 – Ekutalskoye; 35 – Vostochno-Tolumskoye; 36 – Yakhliinskoye; 37 – Malopotanayskoye; 38 – Ontokhsokoye; 39 – Maloshushminskoye; 40 – Novomostovskoye; 41 – Zapadno-Novomostovskoye; 42 – Malokartopinskoye; 43 – Yuzhno-Valovoye; 44 – Zapadno-Slavinskoye

Заключение

Полученные результаты представляют интерес не только для анализа характера распространения коллекторов различных классов. Данные схемы важны при проектировании поисковых работ с целью выявления неструктурных залежей углеводородов. В частности, в северо-восточной и юго-восточной частях Шаимского нефтегазоносного района отмечается аномально-высокая вероятность распространения отложений, проницаемость которых изменяется в интервале от 0,1 до $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (при подсчете запасов и создании проекта разработки залежей углеводородов данные породы практически не учитываются). То есть здесь существует обстановка, негативно влияющая на миграцию флюидов (в первую очередь это касается углеводородов), что в свою очередь создает предпосылки для образования литологических барьеров и, следовательно, формирования ловушек нефти и газа литологического или структурно-литологического типов. Предлагаемый подход позволяет повысить эффективность как освоения месторождений углеводородов, так и проведения поисково-разведочных работ.

Список литературы

1. Федорова М., Кирзелева О., Катаев О. Тюменская свита. Методология создания концептуальных геологических моделей // *Oil & Gas Journal Russia*. 2016. № 11. С. 60–63.
2. Варламов А.И., Гогоненков Г.Н., Мельников П.Н., Черемисина Е.Н. Состояние и перспективы развития цифровых технологий в нефтегазовой геологии и недропользовании России // *Геология нефти и газа*. 2021. № 3. С. 5–20. <https://www.doi.org/10.31087/0016-7894-2021-3-5-20>
3. Карнаухов А.М. Перспективы цифровизации исследовательской деятельности в геологоразведке // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2017. Т. 12. № 4. https://www.doi.org/10.17353/2070-5379/44_2017
4. Хисамов Р.С., Бачков А.П., Войтович С.Е., Грунис Е.Г., Алексеев Р.А. Искусственный интеллект – важный инструмент современного геолога // *Геология нефти и газа*. 2021. № 2. С. 37–45.
5. Потехин Д.В., Путилов И.С. Обоснование применения методов интерпретации гидродинамических исследований скважин с различной конструкцией забоя // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2022. № 4. С. 28–32.
6. Blévec T., Dubrule O., John C.M., Hampson G.J. Geostatistical Earth modeling of cyclic depositional facies

and diagenesis // *AAPG Bulletin*. 2020. Vol. 104. Pp. 711–734. <https://www.doi.org/10.1306/05091918122>

7. Salmachi A., Dunlop E.C., Rajabi M., Yarmohammadtooski Z., Begg S. Investigation of permeability change in ultradeep coal seams using time-lapse pressure transient analysis: a pilot project in the Cooper Basin, Australia // *AAPG Bulletin*. 2019. Vol. 103. Pp. 91–107. <https://www.doi.org/10.1306/05111817277>

8. Ханин А.А. Породы-коллекторы нефти и газа и их изучение. М.: Недра, 1969. 369 с.

9. Страхов П.Н., Колосков В.Н., Богданов О.А., Сапожников А.Б. Исследование неоднородностей нефтегазоносных отложений. М.: ИЦ РГУ нефти и газа, 2018. 189 с.

10. Мельник И.А. Определение статистической интенсивности вторичных геохимических процессов по материалам геофизических исследований скважин // *Нефтяное хозяйство*. 2022. № 1. С. 16–20.

11. Страхов П.Н., Белова А.А., Маркелова А.А., Страхова Е.П. Учет неоднородностей продуктивных отложений при построении геологических моделей как резерв повышения эффективности водогазового воздействия // *Нефтяное хозяйство*. 2021. № 2. С. 46–49. <https://www.doi.org/10.24887/0028-2448-2021-2-46-49>

12. Богданов О.А. Выделение пластов с малоизмененным характером насыщения продуктивных отложений в процессе разработки газовых залежей // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2016. № 3. С. 40–45.

13. Kapustin K., Grushevenko D. Evaluation of long-term production capacity and prospects of the oil and gas industry of Russian Federation // *E3S Web of Conferences – Energy Systems Research (Irkutsk, 2019)*. 2019. Vol. 114. <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/201911402001>

14. Ates H., Bahar A., El-Abd S., Charfeddine M., Kelkar M.G., Datta-Gupta A. Ranking and upscaling of geostatistical reservoir models using streamline simulation: a field case study // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 2005. Vol. 8. Issue 1. Pp. 22–32. <https://www.doi.org/10.2118/81497-PA>

15. Сапожников А.Б. Необходимость обновления принципов постановки геологоразведочных работ с целью оптимизации выявления и разработки залежей углеводородов // *Недропользование XXI век*. 2019. № 3 (79). С. 20–24.

16. Larue D.K., Allen J.P., Beeson D. Fluvial architecture and four-dimensional saturation modeling of a steam flood // *AAPG Bulletin*. 2020. Vol. 104. No. 5. Pp. 1167–1196. <https://www.doi.org/10.1306/12031919080>

References

1. Fedorova M, Kirzeleva O, Kataev O. Tyumen formation. Methodology for creating conceptual geological models. *Oil & Gas Journal Russia*. 2016;(11):60–63. (In Russ.)

2. Varlamov AI, Gogonenkov GN, Melnikov PN, Cheremisina EN. Development of digital technologies in petroleum industry and subsoil use in Russia: current state and future considerations. *Russian Oil and Gas Geology*. 2021;(3):5–20. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.31087/0016-7894-2021-3-5-20>
3. Karnaukhov AM. Prospects for the digitalization of research activities in geological exploration. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2017;12(4). (In Russ.) https://www.doi.org/10.17353/2070-5379/44_2017
4. Khisamov RS, Bachkov AP, Voitovich SE, Grunis EG, Alekseev RA. Artificial intelligence is an important tool for the modern geologist. *Russian Oil and Gas Geology*. 2021;(2):37–45. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.31087/0016-7894-2021-2-37-45>
5. Potekhin DV, Putilov IS. Rationale for the application of methods for interpreting hydrodynamic studies of wells with different bottomhole designs. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2022;(4):28–32. (In Russ.)
6. Blévec T, Dubrule O, John CM, Hampson GJ. Geostatistical Earth modeling of cyclic depositional facies and diagenesis. *AAPG Bulletin*. 2020;104:711–734. <https://www.doi.org/10.1306/05091918122>
7. Salmachi A, Dunlop EC, Rajabi M, Yarmohammadtooski Z, Begg S. Investigation of permeability change in ultradeep coal seams using time-lapse pressure transient analysis: a pilot project in the Cooper Basin, Australia. *AAPG Bulletin*. 2019;103:91–107. <https://www.doi.org/10.1306/05111817277>
8. Khanin AA. *Oil and gas reservoir rocks and their study*. Moscow: Nedra Publ.; 1969. (In Russ.)
9. Strakhov PN, Koloskov VN, Bogdanov OA, Sapozhnikov AB. *Study of heterogeneities of oil and gas deposits*. Moscow: ITs RGU nefti i gaza Publ.; 2018. (In Russ.)
10. Melnik IA. Determination of statistical intensity of secondary geochemical processes based on well logging data. *Oil Industry*. 2022;(1):16–20. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.24887/0028-2448-2022-1-16-20>
11. Strakhov PN, Belova AA, Markelova AA, Strakhova EP. Accounting for productive deposits heterogeneity in geological modeling in order to improve an efficiency of water-alternated-gas injection. *Oil Industry*. 2021;(2):46–49. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.24887/0028-2448-2021-2-46-49>
12. Bogdanov OA. Isolation of reservoirs with a little-changed nature of the saturation of productive deposits during the development of gas deposits. *Science and Technology in the Gas Industry*. 2016;(3):40–45. (In Russ.)
13. Kapustin K, Grushevenko D. Evaluation of long-term production capacity and prospects of the oil and gas industry of Russian Federation. *E3S Web of Conferences – Energy Systems Research (Irkutsk, 2019)*. 2019;114. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.1051/e3sconf/201911402001>
14. Ates H, Bahar A, El-Abd S, Charfeddine M, Kelkar MG, Datta-Gupta A. Ranking and upscaling of geostatistical reservoir models using streamline simulation: a field case study. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. 2005;8(1):22–32. <https://www.doi.org/10.2118/81497-PA>
15. Sapozhnikov AB. The need to update the principles of geological exploration in order to optimize the discovery and development of hydrocarbon deposits. *Subsurface Use of the XXI Century*. 2019;(3):20–24. (In Russ.)
16. Larue DK, Allen JP, Beeson D. Fluvial architecture and four-dimensional saturation modeling of a steam flood. *AAPG Bulletin*. 2020;104(5):1167–1196. <https://www.doi.org/10.1306/12031919080>

Сведения об авторах

Страхов Павел Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-9990-4514, eLIBRARY SPIN-код: 4821-8375; strakhov-pn@rudn.ru

Маркелова Анастасия Андреевна, аспирант, лаборант-исследователь, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-5437-3510, eLIBRARY SPIN-код: 4066-8031; markelova-aa@rudn.ru

About the authors

Pavel N. Strakhov, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9990-4514, eLIBRARY SPIN-code: 4821-8375; strakhov-pn@rudn.ru

Anastasia A. Markelova, postgraduate student, laboratory researcher, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5437-3510, eLIBRARY SPIN-code: 4066-8031; markelova-aa@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-232-245
УДК 550.8.056

Научная статья / Research article

Сравнение инновационных технологий добычи газовых гидратов в Китае и Японии

Х. Сунь , Ц. Хуан , К.А. Воробьев 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация
✉ 1042195045@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 23 марта 2022 г.
Доработана: 8 августа 2022 г.
Принята к публикации: 20 августа 2022 г.

Ключевые слова:

гидраты природного газа, зона стабильности, газогидраты, методы разработки, технологии добычи, окружающая среда

Аннотация. В XX в. огромное внимание в мире уделялось изучению, разведке, освоению месторождений природного газа, представляющих собой обычные (традиционные) газосодержащие скопления углеводородов. Ограниченность и невозможность ресурсов свободного природного газа, растущий спрос на этот энергоноситель неизбежно заставили в XXI в. обратить внимание на значительные потенциальные ресурсы природного газа, заключенные в нетрадиционных источниках. К ним относятся метан угленосных толщ, сланцевый газ, водорастворенные газы подземной и надземной гидросферы, природные газовые гидраты. В исследовании рассматриваются современные технологии разработки природных газовых гидратов, в частности опытно-промышленная разработка месторождения Нанкай на шельфе Японии и ряд крупных месторождений на шельфе Китая. Описаны результаты научных изысканий, а также практический опыт применения различных способов воздействия на месторождения нетрадиционных углеводородов. Приведен ряд ключевых технических решений по разработке месторождений газовых гидратов, таких как контроль песка при добыче, искусственный подъем, геологический мониторинг и мониторинг окружающей среды. Информационная и нормативная база исследования отражает современный уровень развития науки и техники в разработке месторождений полезных ископаемых. Отражен мировой и отечественный опыт разработки технологий воздействия на месторождения нетрадиционных углеводородов с целью оптимизации и интенсификации процесса добычи.

Для цитирования

Сунь Х., Хуан Ц., Воробьев К.А. Сравнение инновационных технологий добычи газовых гидратов в Китае и Японии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 232–245. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-232-245>



Comparison of innovative gas hydrate extraction technologies in China and Japan

Haoyuan Sun , Qihong Huang , Kirill A. Vorobyev 

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

✉ 1042195045@rudn.ru

Article history

Received: March 23, 2022

Revised: August 8, 2022

Accepted: August 20, 2022

Keywords:

hydrates of natural gas, stability zone, gas hydrates, methods for developing, production technologies, environment

Abstract. In the 20th century, great attention in the world was paid to the study, exploration, development of natural gas deposits, which are ordinary (traditional) gas-containing accumulations of hydrocarbons. The limited and irreplaceable resources of free natural gas, the growing demand for this energy carrier inevitably forced in the 21st century to pay attention to the significant potential resources of natural gas contained in unconventional sources. These include coal-bearing methane, shale gas, water-dissolved gases of the underground and aboveground hydrosphere, natural gas hydrates. The authors discuss modern technologies for the development of natural gas hydrates, in particular the pilot development of the Nankai field on the shelf of Japan and a number of large deposits on the shelf of China. The results of scientific research are presented, as well as practical experience in the application of various methods of influencing deposits of unconventional hydrocarbons. The study introduces a number of key technical solutions for the development of gas hydrate deposits, such as sand control during extraction, artificial lifting, geological monitoring and environmental monitoring. The information and regulatory framework of the study reflects the current level of development of science and technology in the development of mineral deposits. The world and domestic experience in the development of technologies for the impact on unconventional hydrocarbon deposits in order to optimize and intensify the production process is reflected.

For citation

Sun H, Huang Q, Vorobyev KA. Comparison of innovative gas hydrate extraction technologies in China and Japan. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):232–245. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-232-245>

Введение

Природные газовые гидраты (водные клатраты) – кристаллические соединения, образующиеся при определенных термобарических условиях из воды и газа. Имя клатраты, от латинского *clathratus*, что значит «сажать в клетку», было дано Пауэллом в 1948 г.

Газовые гидраты стабильны при определенных термобарических условиях, характерных как для осадочных толщ в районах вечной мерзлоты, так и для осадков, залегающих под дном водоемов с глубиной более 400–500 м. Как правило, газогидраты обнаруживаются в осадках внешних континентальных окраин, а также в осадочных бассейнах, в которых действуют напряжения сжатия, в частности, из-за изменения протирания сдвиговых разломов.

Физико-химическая специфика природных газогидратов такова, что они способны аккумуля-

лировать большое количество газа в незначительных объемах и, следовательно, имеют значительный ресурсный потенциал. Однако все оценки ресурсов гидратов природных газов определены приблизительно. Они варьируют от максимальных, явно завышенных, сделанных без учета очевидных геолого-геохимических ограничений до минимальных, проведенных с учетом большого количества факторов, ограничивающих гидратообразование.

Компоненты газа, которые образуют гидраты, включают углеводородные газы, такие как метан, этан, пропан, бутан и их гомологи, а также несколько неуглеводородных газов. Эти молекулы газа существуют в структуре полости в форме клетки, состоящей из молекул воды. Поскольку углеводороды, образующие гидраты природного газа, представляют собой в основном метан (содержание > 99 %), их обычно называют гид-

ратами метана. Горючий лёд содержит огромные ресурсы природного газа. 1 м³ горючего льда эквивалентен 160~180 м³ (стандарт) природного газа. На основе этой оценки глобальные залежи горючего льда составляют около 1,8×10¹⁶~2,1×10¹⁶ м³ ресурсов природного газа, общее количество которых эквивалентно удвоенному общему содержанию углерода в традиционных ископаемых видах топлива в мире.

Некоторые ученые считают, что количество углерода в природных гидратах метана примерно вдвое больше, чем в каменном угле, то есть гидраты метана могут быть основным источником углерода в земной коре.

Высокие предполагаемые значения позволяют рассматривать гидраты метана в поддонных осадках в качестве потенциального и экологически чистого источника энергии будущего.

Другим важным аргументом в пользу разработки и разработки газогидратных залежей (ГГЗ) являются незначительные глубины залегания (по сравнению с традиционным газом) и их широкое распространение в приповерхностных слоях литосферы.

При этом во многом неясны до сих пор условия и механизмы образования газогидратных залежей в природе, а также их поведение в геологическом масштабе времени. Серьезным ограничением для исследований является отсутствие прямых методов поиска газогидратных залежей и картирования гидратосодержащих отложений по коллекторским свойствам. Отсутствует единый подход к ранжированию газогидратных залежей по методам их разработки.

Одним из возможных подходов к решению перечисленных проблем является классифицирование газогидратных залежей по принципам, отражающим геологическую специфику того или иного вида газогидратных скоплений, а также его добычной потенциал. Кроме того, в классификации должна быть заложена информация, позволяющая выбрать тот или иной метод разработки ГГЗ в зависимости от ее вида.

Гидраты метана метастабильны вблизи подошвы зоны стабильности. При повышении уровня моря и росте гидростатического давления на его дне или при уменьшении температуры осадков происходит рост мощности слоя, в котором могут содержаться газогидраты, при условии, что ниже границы зоны стабильности присутствует в необходимых количествах растворенный в воде метан.

Проводятся интересные научные и экспериментальные исследования в области разработки газогидратных месторождений и образования газовых гидратов [1–3].

1. Методы добычи гидрата природного газа в Китае

В настоящее время существует множество методов добычи газогидрата, и типичные из них включают метод снижения давления, тепловой метод и химический метод (рис. 1). Из-за ограничений производственных условий исследования добычи газогидрата по-прежнему в основном сосредоточены на двух аспектах: эксперименте в помещении и численном моделировании [4].

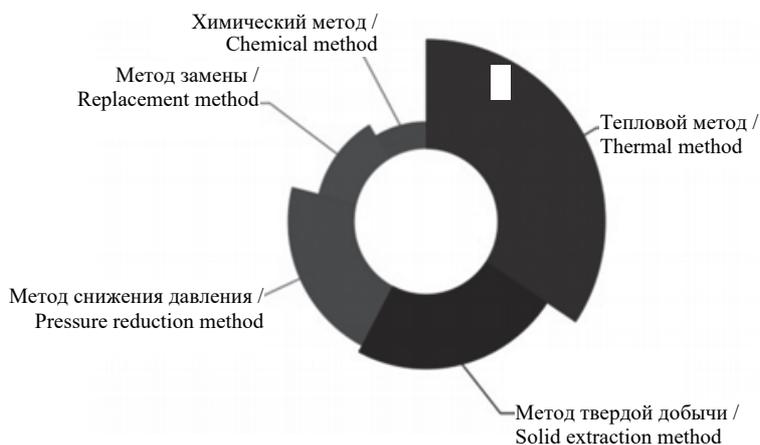


Рис. 1. Доля технологий добычи гидратов природного газа, используемых в Китае
Figure 1. The share of natural gas hydrate extraction technologies used in China

1.1. Метод снижения давления

Метод снижения давления снижает давление гидратного коллектора за счет извлечения грунтовых вод или газлифта. Когда давление гидрата падает ниже равновесного давления, он самопроизвольно разлагается, тем самым реализуя использование гидрата. Метод снижения давления показан на рис. 2 [4]. Поскольку его работа относительно проста, он может способствовать относи-

тельно быстрому разложению большого количества гидрата природного газа, этот метод считается наиболее экономически ценным при добыче горючего льда. В то же время следует отметить, что во время процесса добычи с разгерметизацией понижается температура пласта, что может стать причиной образования льда или вторичного гидрата, заблокировать путь фильтрации и повлиять на эффективность добычи [4].

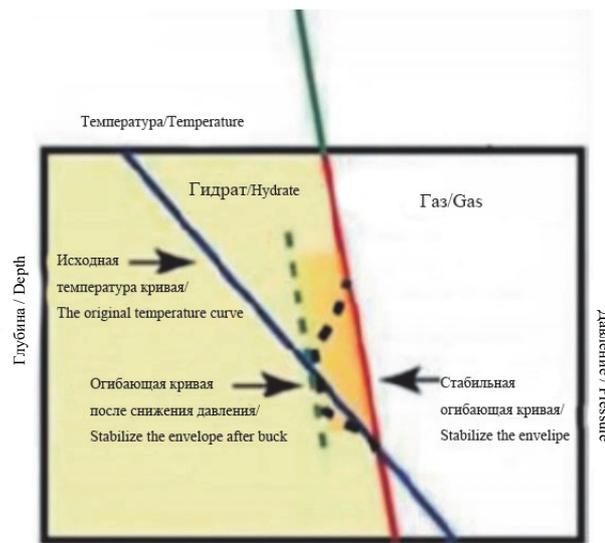
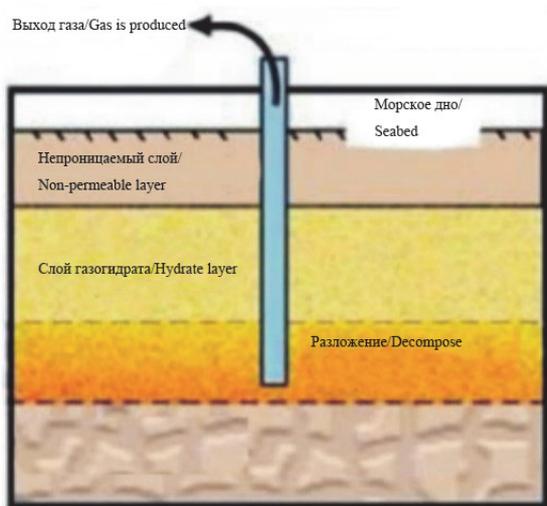


Рис. 2. Принципиальная схема депрессионного метода
Figure 2. Schematic diagram of depression mining method

1.2. Тепловой метод

Тепловой метод заключается в повышении температуры резервуара гидрата каким-либо образом, чтобы сделать ее выше, чем температура равновесия гидрата для разложения гидрата. Добыча с нагнетанием тепла показана на рис. 3 [4], перечислены общие методы нагнетания тепла, а также их преимущества и недостатки. Тепло, потребляемое в процессе закачки тепла, в основном используется для повышения температуры породы-коллектора, повышения температуры жидкости между порами гидрата, разложения и абсорбции гидрата и внешней теплопередачи; в этом процессе, помимо поглощения тепла при разложении гидрата, существуют другие тепловые потери. Проблема отходов, а также из-за наличия горных пород в коллекторе и ограничения теплопроводности поровых флюидов, распространение тепла очень ограничено, и трудно достичь мест, удаленных от добывающей скважины. Различные причины приводят к низкой эффективности добычи с нагнетанием тепла.

В известном в настоящее время процессе добычи на месте метод нагнетания тепла редко используется в одиночку и обычно сочетается с другими методами добычи в качестве средства для быстрого разложения резервуаров гидратов на ранней стадии.

1.3. Метод замены

В методе замены вместо метана используется CO₂ или жидкость. Принцип добычи показан на рис. 4 [4]. Тепло, выделяющееся во время вытеснения, может способствовать разложению гидратов и заставлять рассеянный газ заполнять поры пласта. Процесс замены не предполагает фазового перехода, поэтому он более безопасен. В то же время парниковые газы могут храниться на морском дне, чтобы уменьшить парниковый эффект на суше. Поэтому этот метод вызвал большой интерес у исследователей-специалистов. Однако после исследований было обнаружено, что эффективность замены этого метода невысока, а требуемые условия для замены относи-

тельно жесткие. В то же время CO_2 легко проникает в горную скважину, что создает новые проблемы разделения. В настоящее время существ-

вует несколько коммерческих применений метода замены, но он всегда был горячей темой для исследований [5].

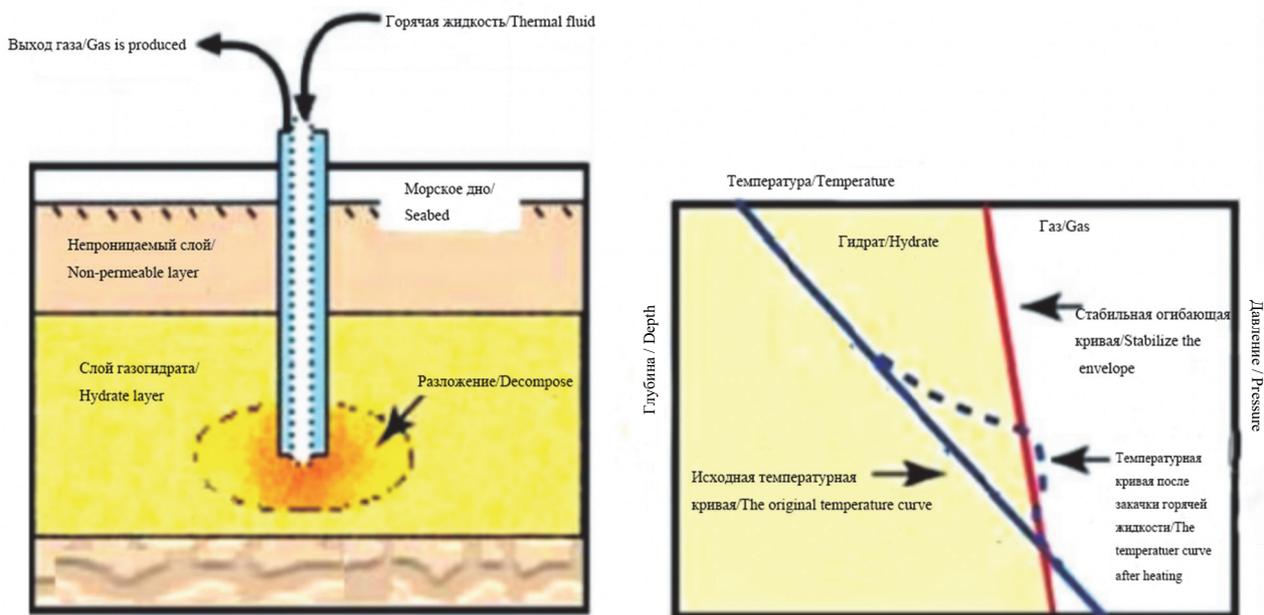


Рис. 3. Принципиальная схема теплового метода
Figure 3. Schematic diagram of thermal injection mining method

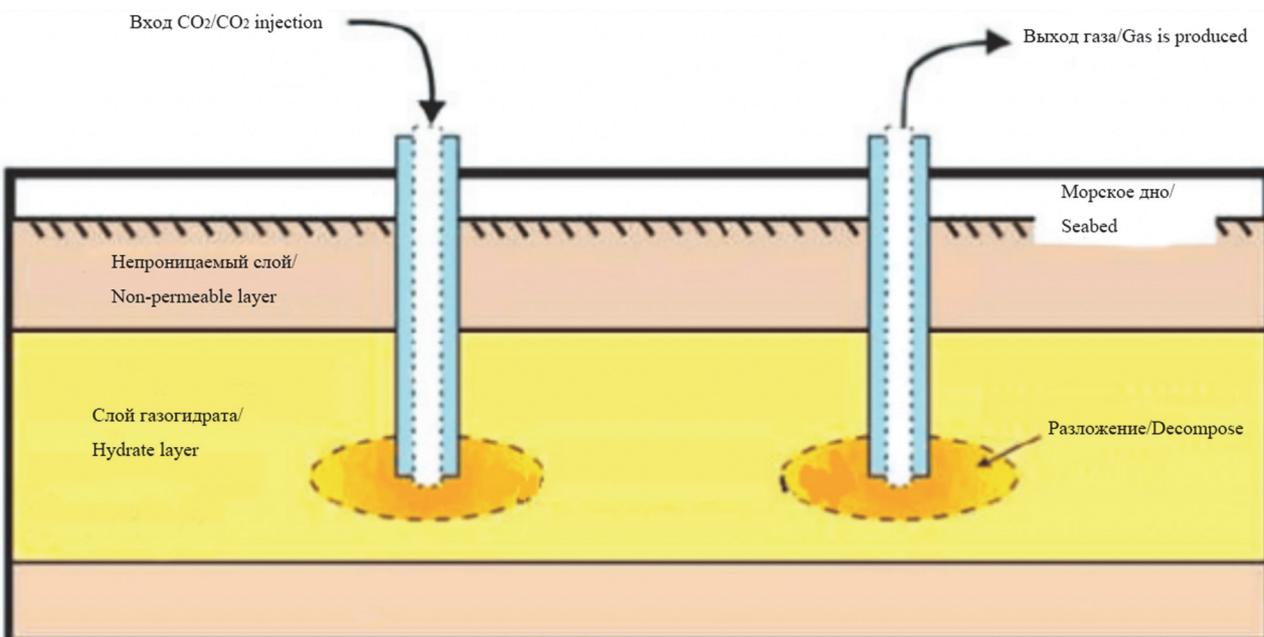


Рис. 4. Принципиальная схема метода замены
Figure 4. Schematic diagram of displacement mining method

1.4. Химический метод

Химический метод вводит химический ингибитор в отложения гидрата, чтобы разорвать водородные связи между молекулами гидрата и

изменить условия фазового равновесия для существования гидратов, чтобы способствовать разложению гидратов. Принцип добычи показан на рис. 5 [4]. Было подтверждено, что этот метод

может увеличить добычу природного газа, и может реализовать разложение гидратов с закачкой очень низкой энергии на начальной стадии эксплуатации. Однако ингибиторы очень дороги.

В то же время ингибиторы будут оказывать неблагоприятное воздействие на грунтовые воды и морскую экологическую среду, поэтому использование этого метода ограничено [5].

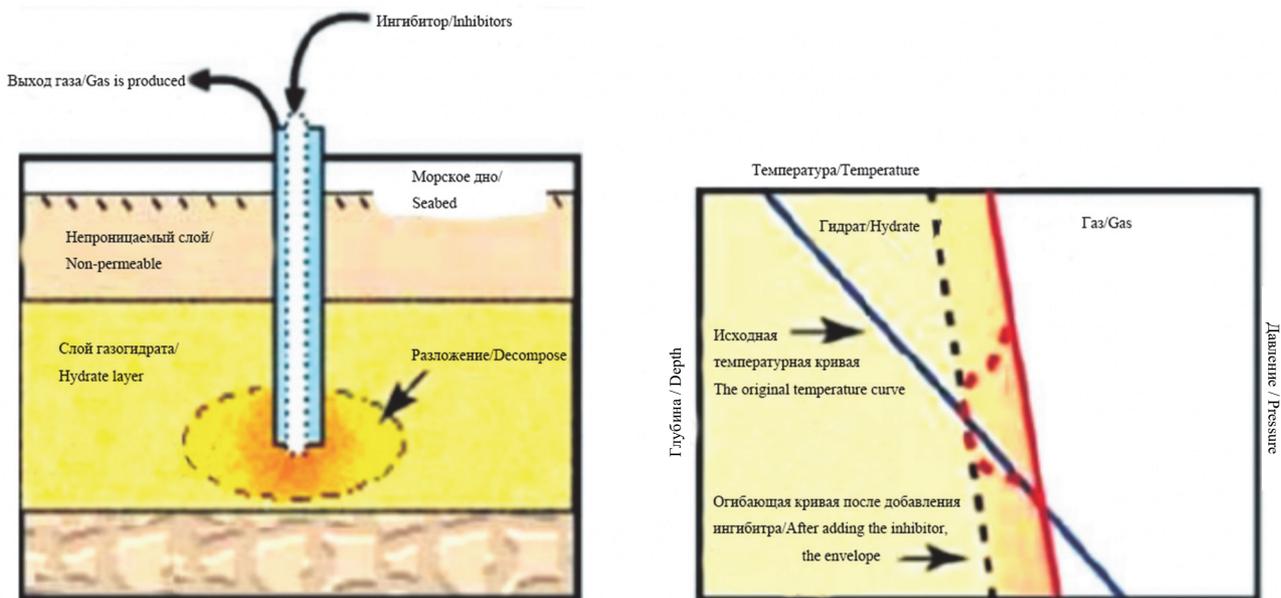


Рис. 5. Принципиальная схема химического метода
Figure 5. Schematic diagram of inhibitor injection method

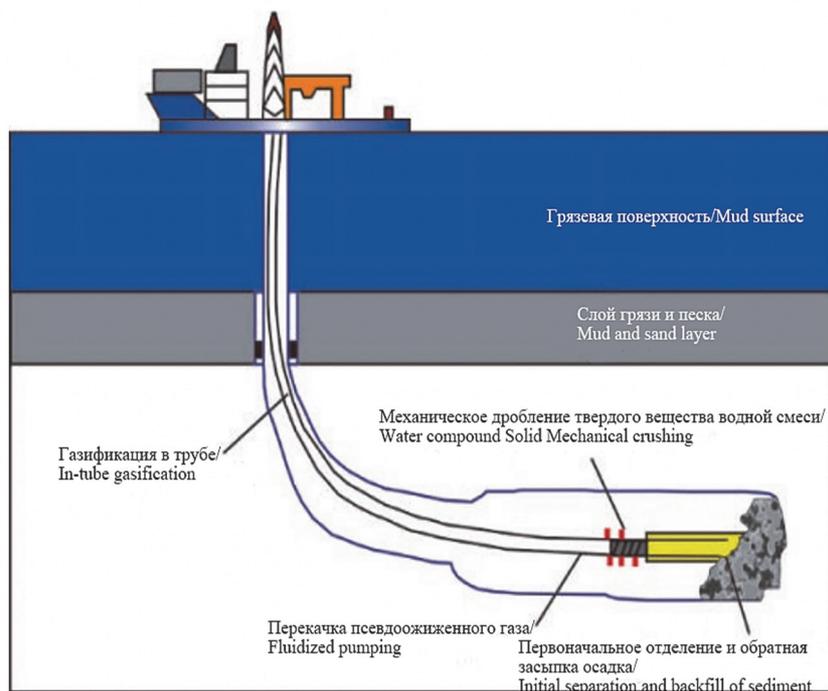


Рис. 6. Принципиальная схема метода добычи в твердом псевдооживленном слое
Figure 6. Schematic diagram of solid fluidization mining method

1.5. Метод добычи в твердом псевдооживленном слое

Твердотельная добыча в псевдооживленном слое – это новый метод добычи гидратов, предложенный в последние годы, который обеспечивает высокую эффективность добычи недиагенетического горючего льда. Принцип добычи этого метода: используйте горное оборудование для непосредственной выемки твердого горючего льда, затем измельчите осадок гидрата на мелкие частицы, а затем транспортируйте его с морской водой на морскую платформу через закрытый стояк и сравните полученный твердый гидрат или суспензию на морской платформе. Принцип добычи показан на рис. 6. [6]. Этот метод реализует твердотельную разработку на месте, снижает риск инженерно-геологических катастроф, вызванных разложением горючего льда, а также в определенной степени позволяет избежать парникового эффекта.

Гидраты природного газа в Южно-Китайском море имеют небольшую глубину залегания, слабую цементацию и легко поддаются фрагментации, что очень подходит для использования метода твердого псевдооживления. Поэтому предложение этого метода вызвало исследовательский интерес многих отечественных ученых. В апреле 2015 г. Юго-Западный нефтяной университет основал первую в мире «Морскую лабораторию недиагенетической добычи газовых гидратов с псевдооживленным слоем, которая может выполнять подготовку твердых гидратов большого объема, оценивать разрушающую способность горного оборудования и проводить псевдооживление гидратов. Оценка емкости горных пород, моделирование процесса транспортировки гидратов по трубопроводам, разложение гидратов и реологические исследования [6]. По имеющимся данным, в мае 2017 г. Китай впервые применил технологию твердотельного псевдооживления в северной части Южно-Китайского моря для достижения пробной добычи с чистотой газа 81 м^3 . Эта промысловая пробная добыча доказала возможность использования метода твердофазного псевдооживления при эксплуатации неглубоких недиагенетических газовых гидратов.

2. Добыча газовых гидратов в Японии

В настоящее время Япония является третьей по величине экономикой в мире, потребляя тем самым огромное количество энергии. Ее земельная площадь невелика, при этом в Японии заметна

серьезная нехватка нефтегазовых ресурсов, которые сильно зависят от импорта. Структура энергетической безопасности в Японии очень слаба. Поэтому Япония положительно относится к освоению новых источников энергии. Страна уже давно начала исследования газовых гидратов, вкладывая в изучение много денег и технического персонала каждый год [7]. Многолетние геологоразведочные исследования доказали, что в Японском море имеется большое количество газовых гидратов, но их добыча представляет собой дорогостоящий и тяжелый процесс. Для того чтобы как можно скорее добиться разработки и добычи морских газовых гидратов, решить внутренние энергетические проблемы, Япония разработала долгосрочный план развития газовых гидратов [8–10].

В 2013 г. Япония осуществила первую в мире пробную добычу морского газового гидрата, пробная глубина добычи составила 1006 м [11], пробная добыча продолжалась 6 дней, общий объем природного газа составил $12 \times 10^4 \text{ м}^3$, среднесуточная добыча газа составила $2 \times 10^4 \text{ м}^3$, совокупная добыча 1245 м^3 [12].

В 2017 г. Япония провела вторую пробную добычу газовых гидратов после полного резюме первой пробной добычи. Первые испытательные горные скважины были запущены в период с 4 по 15 мая, испытательная добыча в общей сложности составила 12 дней. Кумулятивная добыча газа составила $3,5 \times 10^4 \text{ м}^3$, но из-за образования песчаных проблем испытательная добыча была приостановлена. Второй устьевой тест горных скважин был проведен с 5 по 28 июня, тестовая добыча в общей сложности 24 дня кумулятивная добыча газа составила около $20 \times 10^4 \text{ м}^3$.

2.1. Японский метод пробной добычи газовых гидратов

В настоящее время успешная тестовая добыча газового гидрата была осуществлена по средствам следующих методов добычи:

- метод бака;
- термальный метод впрыски;
- химический метод впрыски;
- метод замены углекислого газа;
- подводный твердый метод минирования псевдооживления;
- несколько методов интегрированного использования.

Популярный и широко используемый из всех применяемых методов, является метод бака. По-

нижающий метод, заключающийся в снижении пластового давления газовых гидратов для разрушения стабильных условий наличия гидратного давления, способствующих продолжительному разложению гидратов, считается наиболее эффективным, наиболее экономичным и простым методом пробной добычи газовых гидратов. Однако добыча экономически целесообразна только в том случае, если гидратный резервуар расположен вблизи границы равновесия температуры и давления [13].

В 2013 г. в добыче газовых гидратов использовался метод снижения давления и метод нагнетания тепла, испытывая горную колонну,

как показано на рис. 7 [14] насосном агрегате, который используется для снижения пластового давления и, как следствие, для достижения разложения газового гидрата. Установка нагревательного узла в положении резервуара колонны используется для нагрева газового гидрата, улучшения температуры гидратного резервуара. В результате нагревания происходит повреждение гидратных водородных связей, и далее происходит разложение газового гидрата. После того, как колонна вошла в эксплуатацию, нагреватель повредился и не играл нагревательной роли, тем самым был достигнут ступенчатый метод пробной добычи газового гидрата.

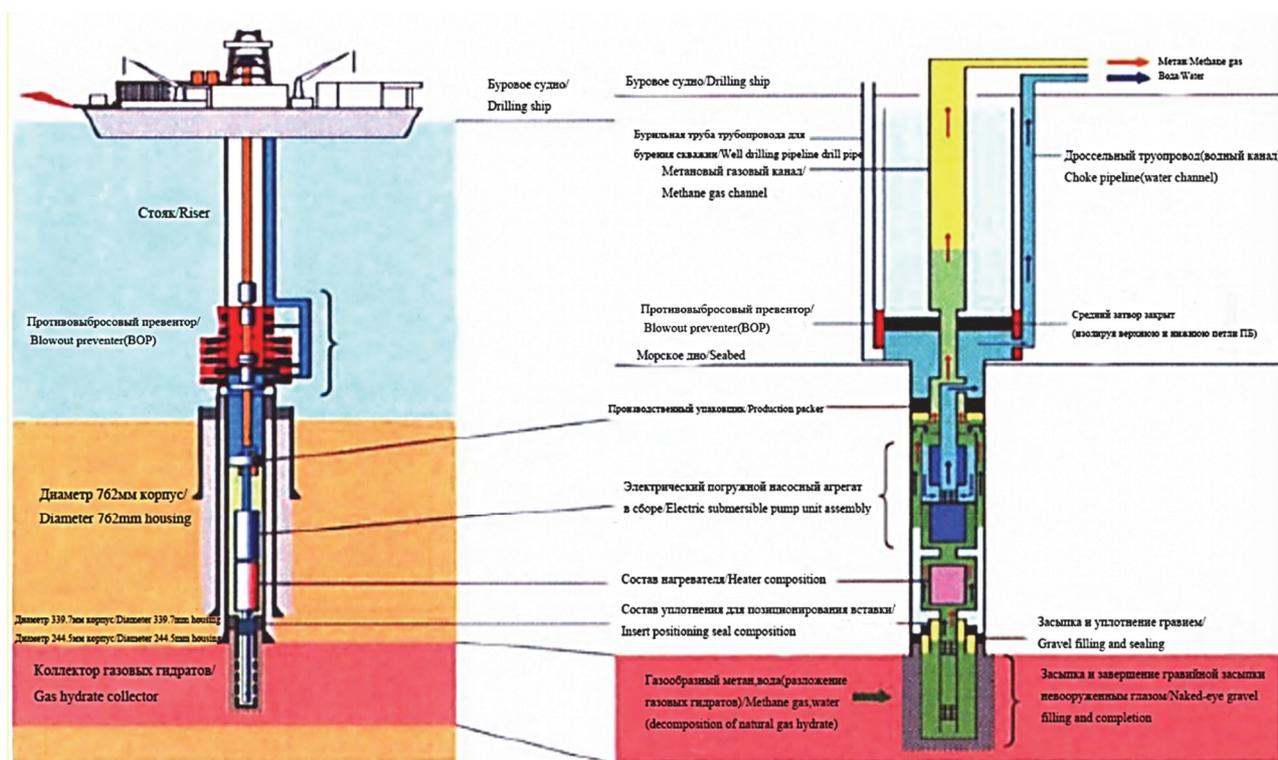


Рис. 7. Испытательная структура ствола скважины для добычи гидратов в Японском море в 2013 г.
Figure 7. Hydrate production test wellbore structure in Japan Sea in 2013

ной добычей полезных ископаемых, для обеспечения стабильности контроля давления и ствола скважины применяется метод пошагового понижения. Газовый гидрат Японского моря в три раза превосходит процесс пробной добычи, и результаты показывают, что текущий уровень технологии при использовании понижающего метода для пробной добычи является простым, наиболее эффективным и наиболее экономичным методом пробной добычи газового гидрата.

В 2017 г. Япония осуществила вторую и третью пробную добычу морских газовых гидратов, используя только метод снижения давления, исключив совместное использование метода нагнетания тепла. После нескольких наземных испытаний и демонстраций было установлено, что энергоэффективность инъекционного теплового метода низка, увеличение нагревательного устройства приведет к увеличению сложности струны. По сравнению с первой опыт-

2.2. Технология контроля гидратного песка

Резервуары с газогидратами находятся в основном в слабо сцементированных породах. Поскольку диагенетическая структура не достигнута, прочность породы низкая. Когда газовый гидрат стабилен, рыхлый пластовый газовый гидрат помогает закрепить пласт. После разложения газового гидрата прочность пласта будет значительно снижена, что приведет к ухудшению гелеобразования, значительному снижению механической прочности пласта, образованию большого количества песка, что в дальнейшем приведет к нестабильности ствола скважины. Поэтому для долговременной добычи газового гидрата необходимо решить проблему песка.

В 2013 г. Япония провела ранний контроль песка, когда осуществила свою первую пробную добычу морских газовых гидратов. Для того чтобы получить большую степень выхода пласта, используется процесс контроля гравийной засыпки песком, осуществляемый по приблизительным расчетам.

Общая масса засыпанного гравия составила около 2136 кг, а давление наполнения – до 8,1 МПа. Пробная добыча была завершена 12 марта 2013 г. На шестой день испытательной добычи был обнаружен слой песка, а датчики контроля давления стали фиксировать резкое увеличение. Также при испытательной добыче добыча воды быстро возросла. Из-за плохих погодных условий на море испытательный корабль «Земля» не имел большого количества выходящего песка, мощности по

переработке жидкой смеси. Донное давление повышалось, добыча газа прекращалась. Чтобы обеспечить безопасность испытательного горного судна и персонала, государство было вынуждено остановить испытательную горную операцию.

Анализ показывает, что образование песка происходит из-за разложения пластового газового гидрата, так как движение гравия, вызванное обнажением песчаного экрана, и образование потока воздуха, приводимого в движение ударом экрана, вызванное разрушением экрана, а затем образование песка и засыпка песка в ствол скважины, приводят к выходу из строя насоса, вынуждая тем самым прекратить весь пробный процесс добычи. За весь пробный процесс бычи образование песка составило 30 м³ [15]. Таким образом, пробный процесс добычи показал, что засыпка гравия способствует увеличению добычи, но его стеновая несущая способность слаба [16].

В 2017 г. Япония осуществила свою вторую морскую пробную добычу полезных ископаемых, отказавшись от схемы засыпки гравия, и приняла систему контроля песка Geoform, разработанную компанией Baker Hughes. Однако, принимая во внимание риск того, что система контроля геоформного песка может не расширяться, Япония использовала предварительно расширенную систему контроля геоформного песка в скважине и систему контроля геоформного песка в скважине расширения двух операционных программ во второй пробной добыче, как показано на рис. 8 [17].

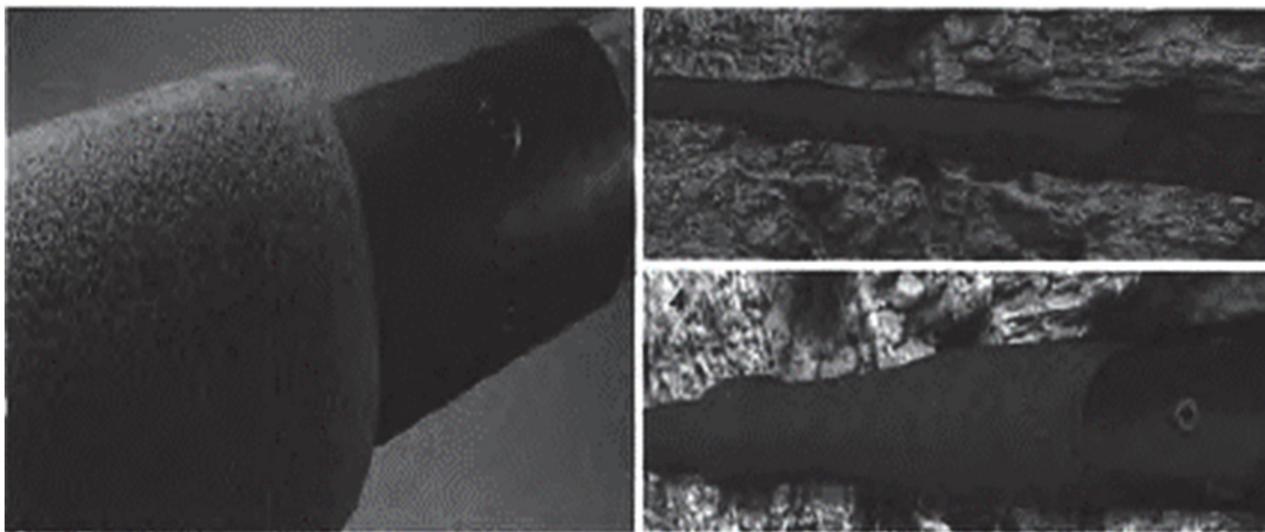


Рис. 8. Экран расширения GeoFORM перед входом в скважину и расширения после входа в скважину
Figure 8. Geoform expandable screen pipe before and after running in the well

Первая испытательная скважина использует грунтовую предварительно расширенную геοформную систему, а затем спускается в скважину. За 12 дней общая добыча газа составила около $3,5 \times 10^4$ м³. После выброса песка, первую скважину вынуждены были отключить. Вторая скважина была использована до самого дна расширения геοформной системы контроля песка. Добыча длилась 24 дня, общая добыча газа составила около 20×10^4 м³. До конца добычи вторая скважина не песковала.

Таким образом, предварительно расширенная геοформная система контроля песка позволяет избежать риска не расширяться в скважину, но есть недостаток опоры стенки, и тогда есть риск нерасширения активного вещества. Такая операция более сложная, но опора стенки и контроль песка оказывают значительный эффект.

Как видно из применения японской технологии контроля песка процесса пробной добычи газового гидрата, долгосрочное производство цементации резервуара разложения газового гидрата уменьшилось, заполнение потока песка приведет к открытому экрану, в то время как стабильность стены снизится. Перед входом в скважину расширение геοформного экрана также не блокирует образование вторжения песка, а после подземного расширения геοформного экрана эффект контроля песка хороший, что указывает на то, что поддержание эффективной блокировки песка и стабильности стенок является ключом к успеху контроля гидратного песка.

2.3. Технология искусственного лифтинга газовых гидратов

Искусственное поднятие является основой для реализации добычи. В пробной добыче газовых гидратов в Японском море использовались:

- погружные электроцентробежные насосы (УЭЦН);
- система снижения гидростатического давления столба в скважине;
- колонная структура: электромагнитный котел + электрический погружной центробежный насос + упаковщик + трубопровод.

С помощью электрического погружного насоса для извлечения пластовой жидкости вручную снижают донное давление, чтобы способствовать стабильному присутствию газового гидрата; нарушаются условия давления, чтобы добиться непрерывного разложения, а затем подземного

газожидкостного разделения. Газ выгружается вдоль центральной колонны, вода, образующаяся после разложения через дросселирующий коллектор (убойный коллектор), поднимается на поверхность платформы в наземный испытательный процесс.

Для достижения понижающего метода испытаний горных работ искусственный подъемный электрический погружной насос включает в себя две ключевые технологии:

- скважинную газожидкостную технологию;
- технологию частотного регулирования.

Скважинный газовый сепаратор обычно используется в качестве всасывающего порта электрического погружного насоса, закрепленного на нижнем конце насоса, разложения газового гидрата после гравитационного разделения вторичного разделения. Технология частотного регулирования через инвертор используется для достижения изменения напора насоса, а также для смещения и расширения объема насоса, для достижения автоматической скорости частотного регулирования. Также технология частотного регулирования используется для того, чтобы поднять газовый замок, автоматический двигатель защиты от пониженной частоты, столкнувшийся с большой нагрузкой, так что электрический погружной насос может адаптироваться к воде и песку, продлить срок службы насоса, увеличить скорость.

В 2013 г. в Японии впервые была проведена пробная добыча полезных ископаемых. Поскольку существует ряд скважин с уменьшенным диаметром ствола, что приводит к более быстрому расходу газа и жидкости, не удалось добиться эффективной гравитационной сепарации, а контроль забойного давления показывал плохие показания. Технология частотного регулирования, использование диаметра в совокупности с системой разделения кожуха, электрического погружного насоса в то же время может повышать эффективность разделения газа и воды.

2.4. Технология геологического и экологического мониторинга

Утечка при разработке гидратов может привести к подводным оползням, обострению глобального парникового эффекта, ухудшению морской экологической обстановки и другим крупным экологическим катастрофам [18–21]. Поэтому в процессе разработки газовых гидратов страны проявляют осторожность.

Япония провела мониторинг на месте во время своих первых морских и гидратных испытаний [22]. В то же время основное внимание уделялось мониторингу деформации морского дна, устойчивости резервуаров, утечке метана, устойчивости гидратных резервуаров.

В 2013 г. три контрольные скважины были пробурены рядом со скважиной АТ1-Р, первой в Японии испытательной добывающей скважиной газового гидрата. Распределенные волоконно-оптические датчики температуры и резистивные матрицы датчиков температуры расположены в контрольных скважинах АТ1-МТ1 и АТ1-МС для осуществления контроля донной температуры и радиуса разложения гидратов. По техническим причинам этот мониторинг не контролировал донное давление.

Результаты экологического мониторинга и экологического исследования морского дна первой пробной добычи гидратного морского песка показывают, что масштабы первой пробной добычи имеют меньший риск воздействия на окружающую морскую среду.

Благодаря анализу, оценке и обобщению первого пробного горного мониторинга, в 2017 г. была осуществлена гидратная пробная горная схема, состоящая из одной разведочной скважины, двух контрольных скважин, двух эксплуатационных скважин, из которых первая контрольная скважина пробурена через слой обогащения газовых гидратов, вторая контрольная скважина пробурена до слоя обогащения для остановки бурения.

Вторая пробная добыча осуществлена для достижения всего процесса мониторинга изменения концентрации морского метана и изменения морского дна, мониторинга скважин в дополнение к организации мониторинга температуры, но и повышенного контроля давления, а также для достижения за год до пробной добычи и пробной добычи после полугодового мониторинга [23].

В 2018 г. были сформированы данные температуры и давления, измеренных на двух наблюдательных скважин. Были получены результаты влияния тест гидратов на окружающую среду морского дна.

3. Последствия исследований и разработок газового гидрата в Японии для Китая

Основываясь на данные исследования разработки гидрата метана в Японии, выдвигаются сле-

дующие предложения относительно будущих исследований и разработок газового гидрата в Китае:

1) четкие цели: газовый гидрат из-за его огромного ресурсного потенциала, рассматриваемого в качестве важного источника энергии в будущем, может быть использован для бурения газового гидрата, а экономические исследования и разработки технологий добычи помогут обеспечить долгосрочную стабильность энергоснабжения Китая;

2) уточняющие цели: например, определение типа и характеристик залегания гидрата метана на шельфе Китая, оценка количества метана, образующегося в ресурсах гидрата метана, скрининг перспективных районов ресурсов газового гидрата и благоприятных зон разработки, разработка исследовательских испытаний в выбранном районе, дальнейшее совершенствование технологии промышленной добычи и создание системы разработки системы в соответствии с конкретными условиями участка, каждый шаг должен иметь четкие и достижимые численные цели и маршруты;

3) разработка дорожной карты: целенаправленное определение приоритетов требуемой работы, шагов по ее осуществлению и ожидаемых результатов;

4) создание имитатора добычи газового гидрата с независимыми правами интеллектуальной собственности, на основе углубленных и детальных разведочных работ и доступа к большому количеству характеристик гидратного пласта, для района обогащения газового гидрата для проведения моделирования добычи и прогнозирования научно-исследовательских работ, с тем чтобы в сочетании с другими методами всесторонней оценки и выбора участков можно было бы отдать приоритет испытаниям добычи;

5) разработка газового гидрата в Китае должна мобилизовать энтузиазм предприятий.

В настоящее время иностранные пилотные проекты по добыче гидрата были осуществлены с участием предприятий и ведущих компаний, таких как ConocoPhillips и Chevron, японское Национальное агентство нефти и газа металлов и минеральных ресурсов, ВР и Южнокорейская национальная нефтяная компания, а также правительственные ведомства, которые должны принимать участие в плане финансирования, политики и управления проектами.

Заключение

Все возрастающий интерес к проблеме газовых гидратов связан с признанием того факта, что в долгосрочной перспективе природные газовые гидраты могут стать новым источником природного газа благодаря весьма значительным ресурсам, неглубокому залеганию и концентрированному состоянию в них газа. Кроме того, накапливаются данные, свидетельствующие о важной роли процессов образования и разложения газовых гидратов в глобальных природных процессах.

В течение ряда лет уже действуют национальные газогидратные программы в США, Японии и Индии. Активизируются исследования в Китае и Южной Корее.

В последние годы по газогидратной проблематике ежегодно проводится 3–4 региональных и международных конференции (последние прошли в Японии, США, Канаде, Германии, Франции), организован ряд постоянно действующих школ (например, начиная с 1996 г. 2–3 раза в год работает Международная школа-семинар *Controlling Hydrates, Waxes and Asphaltenes*). Доклады по различным аспектам газовых гидратов представляются на международные конференции по супрамолекулярной химии, соединениям включения, термодинамике, теплофизике, геокриологии, а также на нефтяных, газовых и геологических симпозиумах и конгрессах.

Анализ литературных источников показывает, что ежегодно по газогидратной тематике в мире публикуется не менее 500–600 работ (что в 2–2,5 раза превышает «фоновое» значение 10–15-летней давности). С «подключением» к данной тематике все более новых специалистов самого разного профиля резко обострилась проблема информационного обеспечения. В настоящее время европейским сообществом при активном привлечении российских специалистов решаются вопросы создания информационных баз, включающих данные по аспектам газогидратной проблемы.

Исследования газовых гидратов можно разделить на три взаимосвязанных направления:

1) фундаментальные исследования (строевые, физико-химические свойства, термодинамика и кинетика образования и разложения газовых гидратов);

2) технологические исследования газовых гидратов (предупреждение гидратообразования

и ликвидация газогидратных отложений, газогидратные технологии);

3) изучение природных газовых гидратов (поиск, разведка, анализ возможностей освоения газогидратных залежей, моделирование природных процессов гидратонакопления в лабораторных условиях), влияние газовых гидратов на глобальные геологические и экологические процессы.

Анализ всех известных газогидратопроявлений показал, что имеется два типа скоплений гидратов: скопления, связанные с очагами разгрузки флюидов на дне морей, которые формируются вблизи дна и контролируются флюидопроводниками (грязевые вулканы, диапиры, разломы), и скопления, прямо не связанные с очагами разгрузки (находящиеся на значительной поддонной глубине), но также контролируемые потоками флюидов. Наличие скоплений второго типа подтверждается результатами глубоководного бурения, выявившего приуроченность таких скоплений к зонам опреснения и к относительно грубозернистым отложениям. Форма и размер скоплений, а также распределение гидратосодержащих пластов в их пределах, определяются потоками газовых флюидов (концентрированными и рассредоточенными) и параметрами диффузионного ореола рассеяния.

Для решения ряда существующих проблем поиска, картирования и разработки субаквальных газогидратных залежей, а также для перехода в исследовании морских газогидратов от уровня «геологии» к уровню «разработки», по мнению исследователей, необходимы следующие шаги:

1. Типизация газогидратных залежей по принципам, отражающим возможные варианты их картирования, ресурсных оценок и разработки. Для субаквальных газогидратных залежей выделены два основных генетических вида залежей: субаквально-биохимические и субаквально-катагенные – и показано, что именно с последним видом газогидратных скоплений в первую очередь связаны основные перспективы разработки субаквальных газогидратов;

2. Анализ возможных механизмов формирования химического состава гидратного газа в том или ином типе залежей. В различных условиях возможно образование как «чистых» метановых газогидратных залежей, так и формирование гидратных залежей со сложным составом газогидратообразователя;

3. Оценка возможности использования скоплений субаквальных газогидратов как индикаторов более глубоких залежей нефти и газа. При прогнозировании подгидратных скоплений углеводородов необходимо учитывать не только наличие каналов их миграции, но и существование в разрезе покрышек и ловушек для перехвата и аккумуляции глубинных углеводородов;

4. Анализ методов разработки субаквальных газогидратных залежей в зависимости от генезиса и химического состава газогидратообразователя, а также от удаленности газогидратных скоплений от береговой линии.

Свойства природного газа в определенных условиях образовывать твердые соединения активно используются в сфере новых технологий.

Предлагается также использовать газовые гидраты как химическое сырье для опреснения морской воды и разделения газовых смесей.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- газовые гидраты являются единственным не разрабатываемым источником природного газа на Земле, который может составить реальную конкуренцию традиционным месторождениям. Значительные потенциальные ресурсы газа в гидратных залежах надолго обеспечат человечество высококачественным энергетическим сырьем;

- освоение газогидратных месторождений требует разработки новых, гораздо более эффективных, по сравнению с существующими, технологий разведки, добычи, транспортировки и хранения газа, которые смогут применяться и на традиционных газовых месторождениях, в том числе на тех, отработка которых сейчас не рентабельна;

- добыча газа из гидратных залежей способна очень быстро изменить ситуацию на газовом рынке, что может повлиять на экспортные возможности Китая и Японии.

Список литературы / References

1. Воробьев А.Е., Малюков В.П., Рыгзынов Ч.Ц. Экспериментальное исследование образования газовых гидратов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 2. С. 85–93.

Vorobev AE, Maluykov VP, Rygzynov ChT. Experimental study of formation of gas hydrates. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2012;(2):85–93. (In Russ.)

2. Воробьев А.Е., Болатова А.Б., Байлагасова И.Л. Методология проведения экспериментальных исследований аквальных газогидратов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2012. № 3. С. 24–35.

Vorobiev AE, Bolatova AB, Baigalasova IL. Methodology for experimental studies of aquatic gas hydrates. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2012;(3):24–35. (In Russ.)

3. Малюков В.П., Токарев И.С. Исследования разработки Нанкайского газогидратного месторождения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 127–136. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2018-19-1-127-136>

Malukov VP, Tokarev IS. Research on the development of the Nankai gas hydrates field. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018;19(1):127–136. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2018-19-1-127-136>

4. Li L, Miao Q. Summary of technological development of natural gas hydrate exploration and development. *General Exploration Institute of China General Administration of Coal Geology*. Beijing; 2014. p. 67–71. (In Chin.) <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-5539.2014.01.018>

5. Zhou S, Li Q, Lv X, Fu Q, Zhu J. Key issues in development of offshore natural gas hydrate. *Frontiers in Energy*. 2020;14:433–442. <https://doi.org/10.1007/s11708-020-0684-1>

6. Wei N, Pei J, Zhao J, Zhang L, Zhou Sh, Luo P, Li H, Wu J. A state-of-the-art review and prospect of gas hydrate reservoir drilling techniques. *Frontiers in Earth Science*. 2022;2:997337. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.997337>

7. Wang C, Du D, Zhu Z, Liu Y, Yan S, Yang G. Estimation of potential distribution of gas hydrate in the northern South China Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*. 2010;28:693–699. <https://doi.org/10.1007/s00343-010-0097-9>

8. Ning F, Liu L, Li Sh, Zhang K, Jiang G, Wu N, Sun Ch, Chen G. Well logging assessment of natural gas hydrate reservoirs and relevant influential factors. *Acta Petrolei Sinica*. 2013;34(3):591–606. (In Chin.) <https://doi.org/10.7623/syxb201303026>

9. Fu Q, Zhou S, Li Q. Natural gas hydrate exploration and production technology research status and development strategy. *Engineering Sciences*. 2015;17(9):123–132. (In Chin.)

10. Zuo R, Li Y. The research and successful production test for NGH in Alaska North Slope, USA. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*. 2017;44(10):1–17. (In Chin.)

11. Yamamoto K. Methane hydrate offshore production test in the Eastern Nankai Trough: a milestone on the path to real energy resource. *Proceedings of 8th International Conference on Gas Hydrates*. Beijing: ICGH8 Organization; 2014.

12. Yamamoto K, Terao Y, Fujii T, Ikawa T, Seki M, Matsuzawa M, Kanno T. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrate in the Eastern

Nankai Trough. Paper OTC-25243-MS (presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2014).

13. Du W. Production test technology of natural gas hydrate. *Well Testing*. 2019;28(1):20–24. (In Chin.)

14. Li Y, Liu L, Liu C, Sun J, Yu G, Chen Q. Sanding prediction and sandcontrol technology in hydrate exploitation: a review and discussion. *Marine Geology Frontiers*. 2016;32(07):36–43. (In Chin.) <https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2016.07005>

15. Yamamoto K, Terao Y, Fujii T, Ikawa T, Seki M, Matsuzawa M, Kanno T. Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough. *Offshore Technology Conference*. 2014. <https://doi.org/10.4043/25243-MS>

16. Rutqvist J, Moridis GJ, Grover T, Silpngarmert S, Collett TS, Holdich SA. Couple multiphase fluid flow and wellbore stability analysis associated with gas production from ocean hydrate-bearing sediments. *Journal of Petroleum Science & Engineering*. 2012;92–93(4):65–81. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.004>

17. Du W. Talking about sand control technology of muddy siltstone. *Petrochemical Industry Technology*. 2018;25(2):141. (In Chin.) <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.06.004>

18. Zhu C, Jia Y, Liu X, Zhang H, Zheng HM, Shan H. Classification and genetic mechanism of submarine landslide. *Geology & Quaternary Geology*. 2015;35(6):153–163.

(In Chin.) <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2015.06.016>

19. Wu X, Zhang B, Zhang W, Wang Y, Sun Z, Shao M. New developments in gas hydrate recovery technology. *Advances in New and Renewable Energy*. 2015;3(3):218–225. (In Chin.) <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2015.03.010>

20. Zuo R, Li Y. Japan's sampling study and successful production test for NGH in Nankai through. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*. 2017;44(12):1–20. (In Chin.)

21. Pang XQ, Chen ZH, Jia CZ, Wang EZ, Shi HS, Wu ZY, Hu T, Liu KY, Zhao ZF, Pang B, Wang T. Evaluation and re-understanding of the global natural gas hydrate resources. *Petroleum Science*. 2021;18:323–338. <https://doi.org/10.1007/s12182-021-00568-9>

22. Zhu C, Zhang M, Liu X, Wang Z, Shen Z, Zhang B, Zhang X, Jia Y. Gas hydrates: production, geohazards and monitoring. *Journal of Catastrophology*. 2017;32(3):51–56. (In Chin.)

23. Fujin Suzuki K, Tamaki M. The election of the candidate location for the second offshore methane hydrate production test and geological findings from the predrilling operation, in the eastern Nankai Trough, Japan. The 9th International Conference on Gas Hydrate. Denver, Colorado USA, June 25–30, 2017.

Сведения об авторах

Сунь Хаюань, аспирант, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-1719-8976, eLIBRARY SPIN-код: 8809-5850; 1042195045@rudn.ru

Хуан Цюхун, магистр, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-1396-1815; 932998181@qq.com

Воробьев Кирилл Александрович, ассистент, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-5792-3979, eLIBRARY SPIN-код: 8425-7290; vorobyev_ka@rudn.ru

About the authors

Haoyuan Sun, PhD student, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1719-8976, eLIBRARY SPIN-code: 8809-5850; 1042195045@rudn.ru

QiuHong Huang, master, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1396-1815; 932998181@qq.com

Kirill A. Vorobyev, assistant, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5792-3979, eLIBRARY SPIN-code: 8425-7290; vorobyev_ka@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-246-253
UDC 56.5(1/9)

Research article / Научная статья

Phenomenological model of the intensity, duration and frequency of precipitation patterns for the Portoviejo river basin, Ecuador

Junior O. Mendoza Alava^a , Valencia Zambrano Xavier Horacio^a , Jorge J. Mendoza Cedeño^a ,
Evgeny K. Sinichenko^b , Ilya I. Gritsuk^{b,c,d} 

^aTechnical University of Manabí, Portoviejo, Republic of Ecuador

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

^cWater Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^dMoscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

 sinichenko-ek@rudn.ru

Article history

Received: March 11, 2022

Revised: September 5, 2022

Accepted: September 10, 2022

Keywords:

hydrology, maximum rainfall, hydraulics, probabilistic model, intensity, duration, frequency curves

Abstract. Phenomenological models represent the behavior of random phenomena in reality, the model and the function it should perform. Similarly, tuning parameters allow us to assess the fit of observed data to a variable in a particular mathematical model and to test the validity of the model for representing a real event. These models, used in the exact and earth sciences, analyze the behavior of complex variables that vary in space and time and are the object of special analysis. The present paper contains statistical and probabilistic analyses of rainfall patterns in the Portoviejo basin over a half-century period. As a result and due to the novelty of the study, a new model of intensity, duration and frequency curves for the most important meteorological stations of the aforementioned basin, such as Portoviejo-UTM and Lodan, was obtained. The data used for the calculation were those provided by the National Institute of Meteorology and Hydrology of Ecuador (INAMHI), the country's state agency for the collection and planning of meteorological data. Calculations were performed separately for the Portoviejo-UTM and Lodan stations. Using the equations obtained, an analysis of the results was done, which made it possible to derive other intensity equations used later in the runoff analysis for the intermediate zones between the two stations considered in this study.

For citation

Mendoza Alava JO, Zambrano Xavier Horacio V, Mendoza Cedeño JJ, Sinichenko EK, Gritsuk II. Phenomenological model of the intensity, duration and frequency of precipitation patterns for the Portoviejo river basin, Ecuador. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):246–253. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-246-253>



Феноменологическая модель интенсивности, продолжительности и частоты выпадения осадков для бассейна реки Портовьехо, Эквадор

Д.О. Мендоза Алава^a , В. Замбрано Ксавье Орасио^a , Дж. Мендоза Сиденьо^a ,
Е.К. Синиченко^b ✉, И.И. Грицук^{b,c,d} 

^aТехнический университет Манаби, Портовьехо, Республика Эквадор

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^cИнститут водных проблем, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация

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

✉ sinichenko-ek@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 мая 2022 г.

Доработана: 5 сентября 2022 г.

Принята к публикации: 10 сентября 2022 г.

Ключевые слова:

гидрология, максимальное количество осадков, гидравлика, вероятностная модель, кривые интенсивности, продолжительности, частоты

Аннотация. Феноменологические модели представляют поведение случайных явлений в реальности, модель и функцию, которую она должна выполнять. Аналогичным образом параметры настройки позволяют оценить соответствие наблюдаемых данных переменной конкретной математической модели и проверить достоверность модели для представления реального события. Эти модели, применяемые в точных науках и науках о Земле, анализируют поведение сложных переменных, которые изменяются в пространстве и времени и являются объектом специального анализа. Настоящая работа содержит статистический и вероятностный анализ моделей осадков, выпавших в бассейне реки Портовьехо за полувековой период. В результате и в связи с новизной исследования получена новая модель кривых интенсивности, продолжительности и частоты для наиболее важных метеорологических станций вышеупомянутого бассейна, таких как Портовьехо-УТМ и Лодана. Для расчета использовались данные, предоставленные Национальным институтом метеорологии и гидрологии Эквадора (INAMHI), государственным агентством страны по сбору и планированию метеорологических данных. Расчеты проводились отдельно для каждой станции. С помощью полученных уравнений выполнен анализ результатов, позволивший вывести другие уравнения интенсивности, используемые в дальнейшем при анализе стока для промежуточных зон между двумя станциями, рассмотренными в исследовании.

Для цитирования

Mendoza Alava J.O., Zambrano Xavier Horacio V., Mendoza Cedeño J.J., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Phenomenological model of the intensity, duration and frequency of precipitation patterns for the Portoviejo river basin, Ecuador // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 246–253. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-246-253>

Introduction

Methods and models have been developed to assess the parameters involved in the formation of surface runoff.¹ In accordance with the generality of

the hydrological cycle, all moisture that reaches the clouds and falls to the ground in the form of snowfall, rain, hail, thaw, etc., is involved in the formation of runoff.

However, there is a hydrographic basin in Ecuador, the Manabí Hydrographic Demarcation, which is distinguished from the others, because its fluvial regime is formed exclusively by rainfall in the rainy season, which generally begins in December and ends in June [1; 2].

¹ Ismayilov GJ, Perminov AV. *Balance hídrico mundial y recursos hídricos de la tierra, catastro del agua y supervisión de los elementos hídricos*. Moscow: FGBOU MGUP; 2013; *Sistemas de información geográfica para aplicaciones agropecuarias en el ordenamiento de territorio y manejo integral de cuencas*. Ministerio de Agricultura y Ganadería, IICA, CLIRSEN; 2015. Available from <http://www.uazuay.edu.ec/promsa/ecuador.htm> (accessed: 03.03.2015); *USDA natural resources conservation*

service soils. United States Department of Agriculture; 2015. Available from <http://www.nrcs.usda.gov/> (accessed: 03.03.2015).

Considering these particularities, to improve, with data updated to the year 2019², the models of Intensity-Duration-Frequency curves for the meteorological stations located in the Portoviejo River basin, this research work has been developed. In which new equations are provided for the estimation of rain intensities of return periods and different durations.

The methods used in the analysis of the stochastic variables of precipitation are based on statistical and probabilistic methods developed throughout the history of earth sciences [3], among which the following stand out: methods of filling data missing from averages, regression line and orthogonal correlation accompanied by the respective data consistency analysis. For the frequency analysis, the data was subjected to the treatment with the Karl Pearson Type III correlation [4–6], where with the 3 moments and with the help of the Foster – Rybkin tables it was possible to estimate the extraordinary events for probabilities between 0.01 to 99.99%.

To obtain the rainfall intensity equations, the method of least squares was used, where the intensities for rainfall durations corresponding to 0, 15, 30, 45, 60, 90 and 120 minutes were processed.

1. Materials and methods

The basic information used for the analysis and development of the research is composed of the pluviometric records of maximum rainfall in 24 hours recorded at the Portoviejo-UTM meteorological stations (Portoviejo (M005) and Lodana (M298) for the period 1964–2019. These Data were provided by the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI) The total number of records used amounts to 1104.

The meteorological stations of the study are in the Portoviejo River basin, which correspond to the Portoviejo-UTM stations, with code MO005, located in the vicinity of the Botanical Garden of the Technical University of Manabí, at coordinates 559523.22 E, 9884982.27N; and the Lodana station, with code MO298, located at coordinates 568606.76 E, 9871040.58N (Figure 1).

To carry out this research, the experience offered by the National Institute of Meteorology and Hydrology (INAMHI)³ [7; 8], in the studies of in-

tense rains carried out in 1999 with its update in 2015 was taken as a starting point, and that, between others, presented a series of equations for estimating rainfall intensities for the entire national territory based on geographic location, duration of storms and specific return periods.

The present work intends to be a complement to the methods that are currently used for the estimation of rainfall intensities, very useful when calculating runoff, product of rainwater drainage [9; 10]. The records used are updated and consistent and correspond to the period 1964–2019.

The most relevant methodological aspects are inscribed in: a) selection of the meteorological stations;⁴ b) collection of the required information; c) analysis of data consistency; d) filling in missing data in the series [11]; e) variability analysis; f) preparation of the probability curve⁵ [12]; g) estimation of rainfall intensities [3]; and h) obtaining the intensity – duration – frequency (IDF) curves.

Based on the values of maximum precipitation in 24 hours, obtained with the Pearson Type III distribution analysis, the weighted values of precipitation were obtained in accordance with the distribution of daily precipitation obtained in the hydrological studies of the basins of the Chone and Portoviejo rivers. This served as the basis for obtaining rainfall intensities for specific return periods.

The functionality for estimating the events corresponding to various return periods contemplated by the Pearson Type 3 methodology is indicated in the formula:

$$x = \bar{x}(1 + TC_v), \quad (1)$$

were x – event (precipitation) for specific return period, mm; \bar{x} – arithmetic mean of records, mm; T – Foster – Rybkin coefficient (probability theory); C_v – coefficient of variation.

The equations for estimating rainfall intensities were obtained by analyzing the method of least squares, whose mathematical expression is summarized in the following expression:

² *Anuarios meteorológicos*. Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología; 2015. Vol. 2015.

³ Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación. Quito: INAMHI; 2015. Available from <https://www.gob.ec/inamhi> (accessed: 25.02.2022).

⁴ *Anuarios meteorológicos*. Secretaría de Gestión de Riesgos; 2014. Available from <http://186.42.174.231/index.php/clima/anuarios-meteorologicos> (accessed: 25.02.2022).

⁵ Rumyantsev VK. *Hydrological calculations in hydro-technical constructions*. Moscow: RUDN University; 1992. (In Russ.)

$$i = \frac{a}{b+t}, \tag{2}$$

where i – rain intensity, mm/h; t – rain duration, min; a and b – coefficients according to the return period.

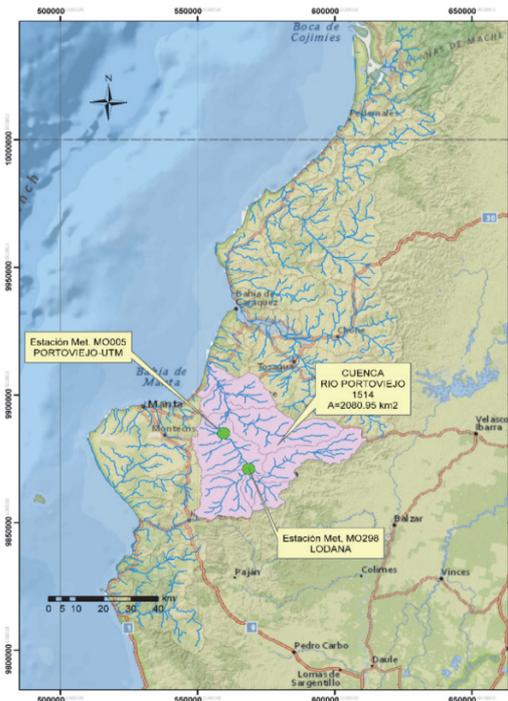


Figure 1. Location of the study area

2. Results and discussion

Based on the guidelines and methodological aspects displayed in the materials and methods section, the rain intensity equations were obtained for the Portoviejo-UTM and Lodana stations, which became a fundamental input for the elaboration of the respective rainfall curves. Intensity – duration – frequency (IDF).

Figure 2 shows the histograms of the variability of the maximum annual rainfall observed in 24 hours for both the Portoviejo-UTM and Lodana stations. In general, it is observed that there is a great non-uniformity in the analyzed values, which is quantitatively evidenced with the calculation of the coefficients of variation, which were obtained equal to 0.54 and 0.56 for the Portoviejo-UTM and Lodana stations respectively. Despite being two geographically distant stations, separated from each other at an approximate distance of 17 km, the climatic variability conditions are similar, which allows statistical inferences to be made on the physical variables of the environment [2].

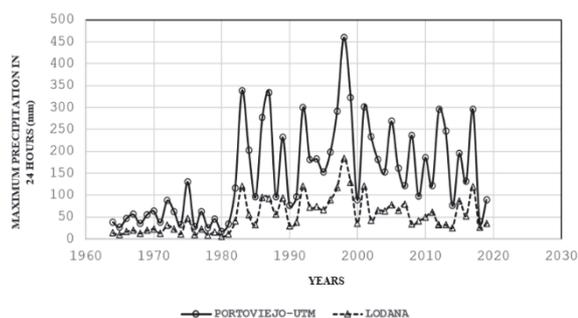


Figure 2. Histograms of maximum precipitation in 24 hours

Tables 1 and 2 show the results of the coefficients of the rain intensity equations for the return periods corresponding to 2, 3, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 500 and 1000 years for the stations under study.

In the case of the Portoviejo-UTM station, applying the equations obtained, various values of rainfall intensities ranging from 5 to 120 minutes, values ranging from 22.17 to 249.88 mm/h, were estimated. These detailed results are summarized in Table 3.

Table 1

Coefficients of the rain equations – Portoviejo-UTM station

Tr, years	a	b
1000	44327.56	155.85
500	40184.24	155.85
200	35508.82	155.85
100	31393.40	155.85
50	27510.75	155.85
25	23183.22	155.85
20	22052.07	155.85
10	17936.65	155.85
5	13690.59	155.85
3	10324.26	155.85
2	7615.46	155.85

Table 2

Coefficients of the rainfall equations – Lodana Station

Tr, years	a	b
1000	16626,45	155,85
500	15331,83	155,85
200	13487,90	155,85
100	12008,29	155,85
50	10509,73	155,85
25	9273,29	155,85
20	8712,82	155,85
10	7255,63	155,85
5	5776,03	155,85
3	4636,64	155,85
2	3691,13	155,85

Table 3

Rain intensity for the Portoviejo-UTM station, mm/h

t, min	Return period, years										
	1000	500	200	100	50	25	20	10	5	3	2
0	284.42	257.83	227.83	201.43	176.52	148.75	141.49	115.09	87.84	66.24	48.86
5	275.58	249.82	220.75	195.17	171.03	144.13	137.09	111.51	85.11	64.18	47.34
10	267.27	242.29	214.10	189.28	165.87	139.78	132.96	108.15	82.55	62.25	45.92
15	259.45	235.20	207.83	183.74	161.02	135.69	129.07	104.98	80.13	60.43	44.57
30	238.51	216.21	191.06	168.91	148.02	124.74	118.65	96.51	73.66	55.55	40.98
45	220.69	200.07	176.79	156.30	136.97	115.42	109.79	89.30	68.16	51.40	37.92
60	205.36	186.16	164.50	145.44	127.45	107.40	102.16	83.10	63.43	47.83	35.28
120	160.69	145.67	128.72	113.80	99.73	84.04	79.94	65.02	49.63	37.43	27.61

Table 4

Rain intensity for Lodana station, mm/h

t, min	Return period, years										
	1000	500	200	100	50	25	20	10	5	3	2
0	106.7	98.4	86.5	77.0	67.4	59.5	55.9	46.6	37.1	29.7	23.7
5	103.4	95.3	83.9	74.7	65.3	57.7	54.2	45.1	35.9	28.8	22.9
10	100.2	92.4	81.3	72.4	63.4	55.9	52.5	43.7	34.8	28.0	22.3
15	97.3	89.7	78.9	70.3	61.5	54.3	51.0	42.5	33.8	27.1	21.6
30	89.5	82.5	72.6	64.6	56.5	49.9	46.9	39.0	31.1	24.9	19.9
45	82.8	76.3	67.2	59.8	52.3	46.2	43.4	36.1	28.8	23.1	18.4
60	77.0	71.0	62.5	55.6	48.7	43.0	40.4	33.6	26.8	21.5	17.1
120	60.3	55.6	48.9	43.5	38.1	33.6	31.6	26.3	20.9	16.8	13.4

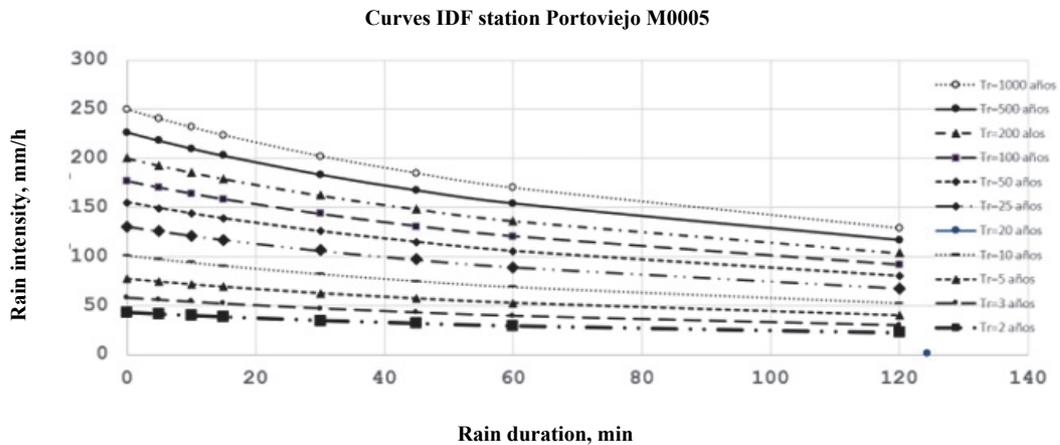


Figure 3. Curves IDF – station Portoviejo

Curves IDF station – Lodana MO0298

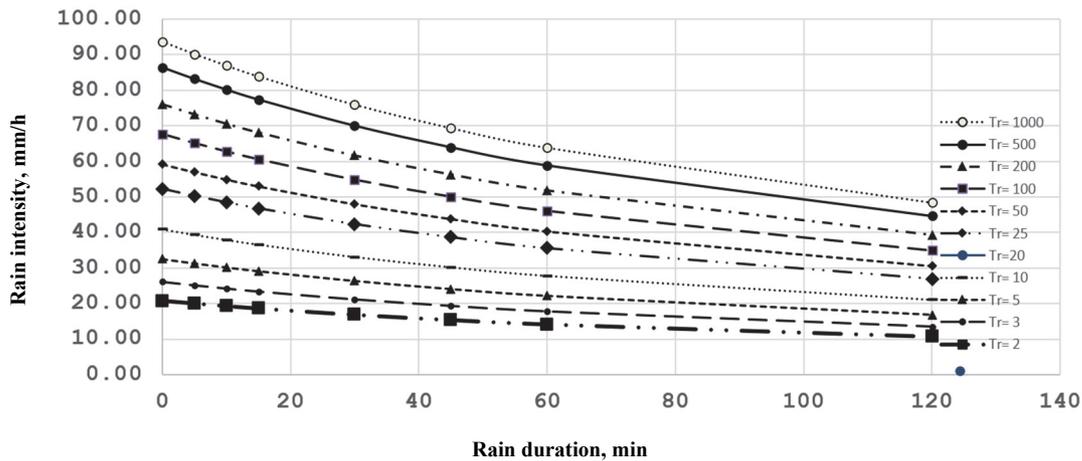


Figure 4. Curves IDF – station Lodana

Similarly, in Table 4, the corresponding rain intensity values for the Lodana station are broken down. In this case, the amounts obtained are in the range of 10.74 to 93.72 mm/h.

The graphic representation of the intensity – duration – frequency (IDF) curves are contained in Figures 3 and 4. Each of these graphs presents three variables, which are important to consider when planning, designing, and controlling water resources that are the result of surface runoff, such as: the intensity of rain, the duration of the storm with its respective frequency of recurrence [2; 13; 14].

Conclusion

Regarding the study and development of information related to the determination of the curves of intensity, duration, and frequency, for different territories of Ecuador, the institution that has led the execution of these projects has been the National Institute of Meteorology and Hydrology, with the support of related development institutions, such as the Manabí Rehabilitation Center, the Manabí Water Resources Corporation, the Water Resources Board, among others. One of the products generated in this context has been the so-called Study of Intense Rainfall, whose initial version came to light in 1999, with an update to the year 2015.

Comparing the values of maximum precipitation in 24 hours obtained through the equations proposed by the National Institute of Meteorology and Hydrology in the study of intense rains with those obtained from this study, it has been established that

the former exceeds to the seconds in average values equivalent to 114.44%. This situation is since the proposed model of this institution considers in the same function the variables of duration of rain and return periods, which could lead to obtaining the results.

Intensity duration and frequency curves were obtained for the Portoviejo-UTM and Lodana stations, located in the Portoviejo River basin. Each of the graphs consists of 11 curves for the corresponding return periods 2, 3, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 500 and 1000. These curves constitute updated information for the year 2019 and serve as support within the field of management and optimization of water resources within the territory within the basin in question.

Once the rainfall intensity equations were obtained, for their validation, rainfall durations ranging from 5 to 120 minutes were considered for both stations. For the case of the Portoviejo-UTM station (MO005), it was estimated that the intensities for return periods between 2 and 1000 years are in the range of 22.17 to 249.88 mm/h; while for the Lodana station (MO298) between 10.74 and 93.72 mm/h. For the intermediate zones between the stations, an inference was made by way of weighting, which allowed, through specific regression analyses, to obtain another 11 equations for the two stations.

According to the analysis of variability in the series of maximum rainfall in 24 hours, it has historically been determined that there is a great non-uniformity in the distribution of rainfall with coefficients of variation greater than 0.5, which leads to

the formation of peaks recurring, estimating in accordance with the trend, that in the future there will be an increase in the values of maximum precipitation in 24 hours above 89.9 mm.

References

1. Campos AF, Sinichenko EK. *Características de sistemas fluviales pequeños y recursos hídricos de la demarcación hidrográfica de Manabí, perspectivas de desarrollo, 2017*. Moscow; 2017.
2. Campos Cedeno AF, Mendoza Alava JO, Sinichenko EK, Gritsuk II. Influence of the El Niño phenomena on the climate change of the Ecuadorian coast. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018;19(4): 513–523. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2018-19-4-513-523>
3. Chow VT, Maidment DR, Mays LW. *Hidrología aplicada* (ME Suarez, ed.). Bogotá; 1994. Available from <https://docer.com.ar/doc/ssx0c8> (accessed: 25.02.2022).
4. Campos AF, Sinichenko EK, Gritsuk II. *Hidráulica e hidrología para ingeniería*. Moscow: RUDN University; 2016.
5. Sinichenko EK. The forecast of changes in hydrological characteristics of small rivers under anthropogenic impact. *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*. 1997;(4):24.
6. Sinichenko EK. Zone changes and generalized characteristics of the water regime of small rivers ETP. *Journal of Engineering Research*. 2005;(1):89–93. (In Russ.)
Синиченко Е.К. Зональные изменения основных и обобщенных характеристик водного режима малых рек ЕТП // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2005. № 1. С. 89–93.
7. Ling L, Yusop Z. *The collective visual representation of Rainfall – Runoff difference model*. Cham: Springer International; 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25939-0_24
8. Zhurkin IG, Shaytura SV. *Geographic information system*. Moscow: Kudits Press; 2009. (In Russ.)
Журкин И.Г., Шайтура С.В. Геоинформационные системы. М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. 272 с.
9. Golian S, Saghafian B, Maknoon R, Elmi M. Probabilistic rainfall thresholds for flood forecasting: evaluating different methodologies for modelling rainfall spatial correlation. *Hydrological Processes*. 2011;25(13): 2046–2055. <https://doi.org/10.1002/hyp.7956>
10. Campos Cedeno AF, Mendoza Cedeno JJ, Sinichenko EK, Gritsuk II, Gritsuk AI. Evaluation of the potential water erosion of the Jama river basin for management and control purposes. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2559. <https://doi.org/10.1063/5.0100219>
11. Chereque M. *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil* (2a ed.). Pontica Universidad Católica del Perú; 1989. Available from: <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28689/hidrologia.pdf> (accessed: 25.02.2022).
12. Krochin S. *Diseño hidráulico*. Ecuador: Editorial Universitaria; 1986. Available from: <https://pdfslide.net/documents/disenio-hidraulico-s-krochin.html?page=1> (accessed: 25.02.2022).
13. Zambrano XHV, Campos Cedeno AF, Mendoza Alava JO, Mendoza Cedeno JJ, Sinichenko EK, Gritsuk II. Mathematical model to determine the runoff coefficient based on precipitation and curve number data, in the Manabi hydrographic demarcation, Ecuador. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1687. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012036>
14. Campos Cedeno AF, Valencia Zambrano XH, Cevallos Castro CA, Sinichenko EK, Gritsuk II. Water supply and demand of the hydrographic demarcation of Manabí, Ecuador. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;675. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/675/1/012021>

About the authors

Junior Orlando Mendoza Alava, Associate Professor, Technical University of Manabí, Av. Urbina y Che Guevara, 130105, Portoviejo, Republic of Ecuador; ORCID: 0000-0002-0395-6927, Scopus Author ID: 57220749191; jmendoza7865@utm.edu.ec

Valencia Zambrano Xavier Horacio, master, engineer, Faculty of Sciences, Mathematics, Physics and Chemistry, Technical University of Manabí, Av. Urbina y Che Guevara, 130105, Portoviejo, Republic of Ecuador; ORCID: 0000-0002-1948-1161, Scopus Author ID: 57220745767; xaviervalenciazambrano@gmail.com

Jorge J. Mendoza Cedeño, Associate Professor, Technical University of Manabí, Av. Urbina y Che Guevara, 130105, Portoviejo, Republic of Ecuador; ORCID: 0000-0002-0567-451X, Scopus Author ID: 57220749191; jmendoza7865@utm.edu.ec

Evgeny K. Sinichenko, Ph.D., Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9159-1218, Scopus Author ID: 6506801225, eLIBRARY SPIN-code: 2900-7009; sinichenko-ek@rudn.ru

Ilja I. Gritsuk, Ph.D., Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; senior researcher, Laboratory of Channel Flow Dynamics and Ice-Thermics, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences,

3 Gubkina St, Moscow, 119333, Russian Federation; Associate Professor of the Hydraulic Department, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 64, Leningradskii Prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5671-7620, Scopus Author ID: 17343469800, eLIBRARY SPIN-code: 5449-8425; gritsuk-ii@rudn.ru

Сведения об авторах

Мендоза Алава Джуниор Орландо, магистр, помощник профессора, факультет строительства, Технический университет Манаби, Республика Эквадор, 130105, Портовьехо, ул. Урбина-и-Че-Гевара; ORCID 0000-0002-0395-6927, Scopus Author ID: 57220749191; jmendo-za7865@utm.edu.ec

Замбрано Ксавье Орасио Валенсия, магистр, инженер, факультет естественных наук, математики, физики и химии, Технический университет Манаби, Республика Эквадор, 130105, Портовьехо, ул. Урбина-и-Че-Гевара; ORCID: 0000-0002-1948-1161, Scopus Author ID: 57220745767; xaviervalenciazambrano@gmail.com

Мендоза Седеньо Хорхе Джонни, магистр, помощник профессора, факультет строительства, Технический университет Манаби, Республика Эквадор, 130105, Портовьехо, ул. Урбина-и-Че-Гевара; ORCID: 0000-0002-0567-451X, Scopus Author ID: 57220749191; jmendo-za7865@utm.edu.ec

Синиченко Евгений Константинович, кандидат технических наук, доцент департамента строительства, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-9159-1218, Scopus Author ID: 6506801225, eLIBRARY SPIN-код: 2900-7009; sinichenko-ek@rudn.ru

Грицук Илья Игоревич, кандидат технических наук, доцент департамента строительства, Инженерная академия. Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; старший научный сотрудник, лаборатория динамики русловых потоков и ледотермики, Институт водных проблем, Российская академия наук, Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; доцент кафедры гидравлики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-кт, д. 64; ORCID: 0000-0002-5671-7620, Scopus Author ID: 17343469800, eLIBRARY SPIN-код: 5449-8425; gritsuk-ii@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-254-262
УДК 551.73/.78

Научная статья / Research article

Закономерности и геоисторические предпосылки нефтегазовой специализации рифтогенных осадочных бассейнов Африки

В.М. Усова

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

usova-vm@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 4 июля 2022 г.
Доработана: 20 сентября 2022 г.
Принята к публикации: 22 сентября 2022 г.

Ключевые слова:

рифтогенные бассейны, поздний фанерозой, нефтегазовая специализация, рифтовые бассейны, Африка, офшорные бассейны, гранулитовые пояса

Аннотация. В Африке и на ее подводных окраинах расположены осадочные бассейны позднего фанерозоя рифтового происхождения. Причины нефтегазовой специализации бассейнов данного класса остаются во многом неясными. Выявлены закономерности, которые могли иметь в этом отношении определяющее значение. Внутриконтинентальные бассейны характеризуются почти исключительно месторождениями нефти. В периконтинентальных бассейнах значение месторождений газа уменьшалось, а нефти увеличивалось в соответствии с уменьшением времени их рифтового заложения и прогибания (от С3, Р-11, К1 до J5-K12). Дифференциация бассейнов на тектонотипы «незавершенного» и «завершенного» развития, а также асинхронность прогибания вторых, ответственно с размерами и возрастом панафриканских гранулитовых поясов, в которых бассейны заложались. Поскольку эти пояса являлись наиболее активными коровыми структурами, данная закономерность может рассматриваться как свидетельство влияния их унаследованных или возрожденных глубинных «энергосистем» на процессы рифтогенеза и генерации углеводородов. Привлечение данных сейсмотомографии показало, что преимущественно нефте- и газоносные рифтогенные бассейны расположены в областях менее и более разогретой мантии соответственно. Приведен пример вероятного влияния на нефтегазовые системы бассейнов центров кайнозойского островного вулканизма. Сравнительный анализ геолого-геофизических данных, в том числе и по тепловым потокам, приводит к заключению, что температурные условия образования углеводородов в рифтогенных бассейнах Африки определялись сочетанием глубинных тепловых систем разных масштабов: региональных (континент – океан), субрегиональных (корово-структурных) и локальных (вулканических центров).

Благодарности

Автор выражает благодарность доктору геолого-минералогических наук Е.А. Долгинову за советы при подготовке статьи к публикации.

Для цитирования

Усова В.М. Закономерности и геоисторические предпосылки нефтегазовой специализации рифтогенных осадочных бассейнов Африки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 3. С. 254–262. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-254-262>

© Усова В.М., 2022



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

Regularities and geohistorical prerequisites of oil and gas specialization of rift sedimentary basins of Africa

Valentina M. Usova 

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

✉ usova-vm@rudn.ru

Article history

Received: July 4, 2022

Revised: September 20, 2022

Accepted: September 22, 2022

Keywords:

rift basins, late Phanerozoic, oil, gas, specialization, rift basins, Africa, offshore basins, granulite belts

Abstract. Sedimentary basins of Late Phanerozoic rift origin are located in Africa and on its underwater margins. The reasons for the oil and gas specialization of basins of this class remain largely unclear. Patterns have been identified that could be of decisive importance in this regard. The intracontinental basins are characterized almost exclusively by oil deposits. In the pericontinental basins, the value of gas deposits decreased, and oil increased in accordance with the decrease in the time of their reef laying and deflection (from C3, P-J1, K1 to J5-K12). The differentiation of basins into tectonotypes of “incomplete” and “completed” development, as well as the asynchronous deflection of the latter reflected in their oil and gas specialization, correlate accordingly with the size and age of the Pan-African granulite belts in which the basins were laid. Since these belts were the most active core structures, this pattern can be considered as evidence of the influence of their inherited or reborn deep “energy systems” on the processes of rifting and generation of hydrocarbons. The use of seismography data showed that mainly oil and gas-bearing rift basins are located in areas of less and more heated mantle respectively. An example of the probable influence of Cenozoic island volcanism centers on oil and gas basin systems is given. A comparative analysis of geological and geophysical data, including heat flows, leads to the conclusion that the temperature conditions of hydrocarbon formation in the rift basins of Africa were determined by a combination of deep thermal systems of different scales: regional (continent – ocean), subregional (cow-structural) and local (volcanic centers).

Acknowledgements

The author expresses gratitude to the Doctor of Geological and Mineralogical Sciences E.A. Dolginov for advice in preparing the article for publication.

For citation

Usova VM. Regularities and geohistorical prerequisites of oil and gas specialization of rift sedimentary basins of Africa. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(3):254–262. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-254-262>

Введение

В Африке и на ее подводных окраинах расположены осадочные бассейны позднего фанерозоя рифтового происхождения (внутри- и переконтинентальные), большинство которых являются нефтегазоносными. При сравнительно высокой степени изученности бассейнов остается нераскрытыми причины их углеводородной специализации. Целью проведенного исследования, главные результаты которого изложены в настоящей статье, явилось выяснение этого актуального в региональном и теоретических планах,

вопроса. Он базировался на указанных в тексте публикациях по геологии бассейнов, их коровой инфраструктуры и региональной сейсмотомографии. Главное направление исследования было ориентировано на установленное ранее совпадение рифтогенных бассейнов с гранулитовыми поясами являвшимися наиболее выраженными и длительно развивавшимися (то есть активными) структурами самой молодой, так называемой панафриканской коры [1]. Именно это позволило выявить ряд важных закономерностей развития рифтогенных бассейнов, имевших отношение к их нефтегазовой специализации.

В Африке осадочные бассейны позднего фанерозоя рифтового происхождения (внутри- и переконтинентальные) характеризуются разной нефтегазовой специализацией, причины чего остаются неясными. Проведенные исследования позволили подойти к решению этого вопроса. Выявлено влияние на условия нефтегазообразования в бассейнах данного типа тепловых источников из глубинных систем их коровых интрасруктур, а вдоль подводных окраин Африки «тепловых полей» океанов.

1. Рифты «незавершенного» и «завершенного» типа

В «Большой Африке», включающей ее наземную часть и подводные окраины в позднем

фанерозое формировались рифтовые бассейны нескольких генераций двух главных типов: сохранившие свое изначально материковое положение; оказавшиеся под водами рожденных в них океанов и комплексами морских отложений. В литературе такие бассейны именуются рифтами «незавершенного» и «завершенного» развития (типов) соответственно. Для удобства изложения материала бассейны обоих типов рассматриваются под общим термином «рифтогенные».

В рифтогенных внутри- и периконтинентальных бассейнах выявлены многочисленные промышленные скопления углеводородов [2] с различным соотношением месторождений нефти и газа (рис. 1).



Рис. 1. Расположение рифтогенных бассейнов с различной нефтегазовой специализацией:

1 – рифтовые внутриконтинентальные бассейны – почти исключительно нефтеносные; 2–5 – эпирифтовые периконтинентальные бассейны: 2 – преимущественно нефтеносные, 3 – преимущественно газоносные, 4 – почти исключительно газоносные, 5 – бассейны Морондава с термально разрушенными месторождениями нефти; C – Сирте; T – Термит; My – Муджлад

Figure 1. Location of rift basins with different oil and gas specialization:

1 – rift intracontinental basins – almost exclusively oil-bearing; 2–5 – epi-rift pericontinental basins: 2 – mainly oil-bearing, 3 – mainly gas-bearing, 4 – almost exclusively gas-bearing, 5 – Morondava basins with thermally destroyed oil fields; C – Sirte, T – Termite, My – Mujlad

В рифтовых бассейнах «завершенного» развития, перешедших в стадии синокеннического прогибания их большая часть содержится в верхних морских комплексах, содержащих главные

нефтематеринские отложения [3]. Оба этих обстоятельства могут явиться основой для предположения о независимости систем этих так называемых дрейфовых комплексов и вызывать со-

мнение в корректности сопоставления углеводородной специализации внутри- и периконтинентальных бассейнов хотя и имеющих общее рифтовое происхождение. Приведенные ниже геологические закономерности размещения месторождений нефти и газа вносят ясность в этот актуальный для нашего анализа вопрос.

2. Корреляция нефтегазовой специализации

Установлена четкая корреляция нефтегазовой специализации рифтогенных бассейнов с их расположением, а периконтинентальных бассейнов – со временем их рифтового заложения и прогибания. Крупнейшие внутриконтинентальные бассейны «незавершенного» развития Центральной Африки Муджлад (Судан) и Термит (Нигер), начавшие прогибание в начале неокома и поздне меловой Сирт (Ливия) характеризуются почти исключительно месторождениями нефти (рис. 1). В офшорных бассейнах периферии Гвинейского залива, испытавших рифтовое прогибание в разные эпохи раннего мела, частично с поздней юры, также главное значение имеют месторождения нефти, однако при подчиненной роли месторождений газа.

Бассейны подводных окраин Юго-Восточной и Юго-Западной Африки, испытавшие рифтовое развитие с позднего карбона до ранней юры и раннего мела соответственно характеризуются почти исключительно месторождениями газа, в том числе и очень крупными. Газовые месторождения свойственны также для офшорного бассейна Ламу (Кения) и бассейна Огадена Эфиопии, прошедших рифтовое развитие в перми – раннем триасе. В Мавритано-Сенегальском бассейне Северо-Западной Африки, рифтовое прогибание которого происходило в триасе, выявлены крупные месторождения газа, в меньшей мере нефти (рис. 1, 2). Эти данные свидетельствуют о том, что нефтегазовая специализация синокеанических комплексов периконтинентальных бассейнов определялась в значительной степени (или главным образом) системами генерации углеводородов, возникшими во время их рифтового развития.

О вероятной природе обеих закономерностей позволяют судить следующие факты и аргументы. Хорошо известно, что генерация жидких и газообразных углеводородов происходит при различных, соответственно менее и более высоких температурных условиях. Из этого, с учетом рассмотренной выше закономерности распре-

ления месторождений нефти и газа следует, что эпирифтовые периконтинентальные и внутриконтинентальные рифтовые бассейны развивались соответственно в условиях относительно более низких и более высоких тепловых потоков и градиентов.

Такое заключение хорошо согласуется с различиями «энергоресурсов» глубинных рифтообразующих систем, обеспечивающих главным образом денсификацию и лишь частичное механическое разрушение материковой коры («незавершенный» рифтогенез) или полное разрушение древней литосферы и рождение океанов («завершенный» рифтогенез).

Имеются основания считать, что глубинные «энергосистемы», обусловившие тектоническую дифференциацию рифтовых структур, возникли во время структурного оформления самого молодого, так называемого панафриканского фундамента, консолидированного в конце протерозоя, местами вдоль окраин Африки в раннем-среднем палеозое [4].

Свидетельством этому является совпадение рифтовых бассейнов «незавершенного» и «завершенного» развития с панафриканскими гранулитовыми поясами разных размеров, образованных в целом наиболее активными, но различными по интенсивности процессами корообразования. А именно, установлено, что внутриконтинентальные рифты совпадают с гранулитовыми поясами сравнительно небольших размеров [5; 6], а рифты другого типа, предопределившие дезинтеграцию Гондваны, заложилась по гранулитовым мегапоясам, высокоплотные и резко «утоненные» комплексы которых образуют «транзитную» кору под офшорными бассейнами и залегают в тектонических покровах на материковых окраинах Танзании, Мозамбика, Мадагаскара, Намибии, Либерии, Сьерра-Леоне и Мавритании. Идея о нижнекорой природе фундаментов офшорных бассейнов была высказана еще в середине прошлого столетия, а затем подтверждена многими исследователями в том числе и последних лет [7].

3. Причины нефтегазовой специализации

Вторым из обсуждаемых является вопрос о причинах нефте- или газовой специализации периконтинентальных эпирифтовых бассейнов разного возраста. Подойти к его решению удалось с привлечением данных о возрасте коровых

комплексов гранулитовых мегапоясов, в которых заложилась рифтовые бассейны «завершенного» развития [8; 9].

Проведенное исследование позволило выявить смещение рифтовых структур данного типа от более молодых (то есть более «активных») сегментов к более древним (менее «активными») сегментам мегапоясов (рис. 2).

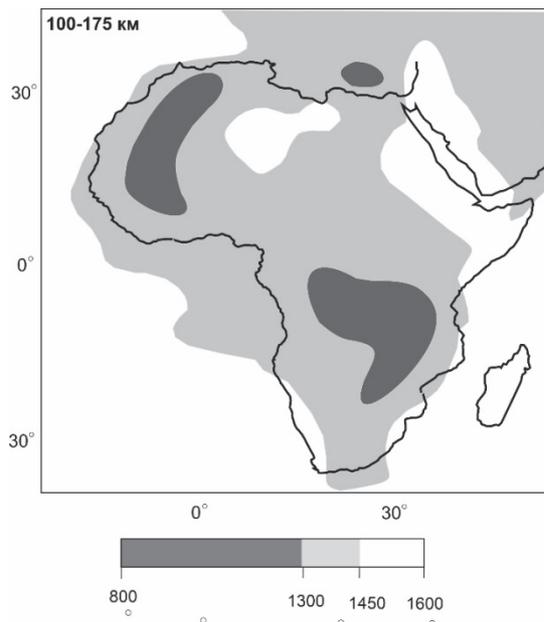


Рис. 2. Температура верхней мантии Африки на глубине 180 км (по [10] с упрощениями)
Figure 2. Temperature of the upper mantle of Africa at a depth of 180 km (based on [10] with simplifications)

Эта закономерность может интерпретироваться как свидетельство влияния остаточных или возрожденных энергоресурсов глубинных систем гранулитовых мегапоясов не только на последовательность рифтообразования и разрушения древней литосферы, но также на температурные условия генерации в осадочных комплексах газообразных или жидких углеводородов.

Повышенная тектоно-термальная активность восточноафриканского гранулитового мегапояса, в котором заложилась ранние и главные газоносные бассейны проявилась не только в его затянувшемся до середины палеозоя формировании. Установлено, что гранулиты Мадагаскара, являвшиеся частью этого мегапояса, образовались при исключительно высоком геотермальном градиенте в 25–50 °C/км около 0,58–0,53 млрд лет назад [11].

В интервале 500–450 млн лет назад на Мадагаскаре и в Восточной Африке, в областях распро-

странения «молодых» гранулитов, происходили широкомасштабные процессы гидротермальной деятельности и связанное с ней массовое образование послескладчатых пегматитов с драгоценными и полудрагоценными камнями [1]. Различной разогретостью недр «малых» и «больших» гранулитовых поясов была обусловлена неравномерность в рифтогенных бассейнах синседиментационного магматизма. Он в виде излияния базальтов проявился лишь в самых ранних периконтинентальных бассейнах Юго-Восточной, Юго-Западной отчасти Западной Африки, заложившихся в самых молодых сегментах гранулитовых мегапоясов. Мантийный магматизм завершал переход от рифтового к послерифтовому развитию бассейнов Нижнего Замбези в ранней юре (вулканиты «моноклинали Лемомбо»), бассейнов Оранж, Людерец, Валвис – в раннем мелу, происходил в позднемеловое время при синокеаническом прогибании бассейна Морондава Мадагаскара.

С базальтоидного магматизма начиналось рифтовое развитие в юре рифтовых, ныне офшорных бассейнов Либерии – Гвинеи. На условия генерации углеводородов в осадочных бассейнах рассматриваемых типов помимо тепловых источников из автономных глубинных систем рифтообразования, возникших во время формирования «малых» и больших гранулитовых поясов оказывали влияние и региональные тепловые неоднородности верхней мантии. Свидетельством этому является расположение преимущественно или исключительно нефтеносных и газоносных бассейнов в «полях» соответственно умеренно и максимально разогретой мантии, что хорошо видно при сопоставлении рис. 1 и 2. Особенно показательным в этом отношении являются периконтинентальные рифтогенные бассейны с различной нефтегазовой специализацией. Из них преимущественно нефтеносные бассейны периферии Гвинейского залива находятся в области распространения в сторону Атлантического океана умеренно разогретой «континентальной» мантии, а газоносные бассейны расположены в районах температурных «ингрессий» на окраины Африки наиболее разогретой мантии обоих окружающих ее океанов.

Следует отметить хорошо выраженную корреляцию с тепловыми неоднородностями мантии Атлантического и отчасти Индийского океанов измеренных придонных тепловых потоков [12], что является дополняющим аргументом влияния теплового состояния океанов на осадочные ком-

плексы рифтогенных бассейнов и их нефтегазовые системы.

Сочетание автономных тепловых источников из геосистем гранулитовых мегапоясов и влияния «тепловых полей» верхней мантии океанов нашло отражение в неравномерностях измеренных тепловых потоков в периконтинентальных преимущественно газо- и нефтеносных бассейнах [13]. Высокие тепловые аномалии выявлены в ранних офшорных бассейнах Танзании, Кении (80–85 мВ/м²), атлантической окраины ЮАР, Намибии (66–72 мВ/м²), Мавритании и Сенегала (61–150 мВ/м²). Существенно уступают им в этом отношении более молодые бассейны периферии Гвинейского залива. Вместе с тем среди них есть одно исключение, подтверждающие, однако общую закономерность. Оно

относится к прибрежному району Габона (рис. 3). На рисунке стратиграфическими индексами показаны возрастные интервалы прогибаний «завершенного» развития (вдоль окраин Африки) и время заложения бассейнов «незавершенного» развития (в Центральной и Северной Африке). Цифрами (млн лет) показаны: в скобках временные диапазоны рифтовых прогибаний переконтинентальных бассейнов, в прямоугольниках возраст нижнекоровых комплексов «транзитной» коры, залегающих на окраинах Африки и Мадагаскаре. Здесь крупная тепловая аномалия в 100 мВ/м² совпадает с Береговым (Восточным) бассейном, рифтовое развитие которого началось в перми, было приостановлено в триасе и продолжило в юре-раннем мелу [14].



Рис. 3. Нефтегазовые рифтогенные бассейны позднего фанерозоя Африки:
эпифрифтовые периконтинентальные: 1 – Дахла-Дуккала, 2 – Сенегало-Мавританский, 3 – Гвинейско-Либерийский, 4 – Кот-д'Ивуара, 5 – Тано, 6 – Кета, 7 – Дуала-Рио-Муни, 8 – Габонский, 9 – Кванза-Нижнего Конго, 10 – Валвис-Людерец, 11 – Оранж, 12 – дельты Замбези, 13 – Морондава, 14 – Рувума, 15 – Пемба-Ламу, 16 – Сомалийский (возможно нерифтогенный);
рифтовые внутриконтинентальные: 17 – Сирт, 18 – Термит, 19 – Саламат, 20 – Муджлат
Figure 3. Oil and gas rift basins of the Late Phanerozoic of Africa Epirift pericontinental:
epirift pericontinental: 1 – Dakhla-Dukkala, 2 – Senegalese-Moorish, 3 – Guinean-Liberian, 4 – Ivory Coast, 5 – Tano, 6 – Keta, 7 – Douala-Rio Muni, 8 – Gabonese, 9 – Kwanza-Lower Congo, 10 – Valvis-Luderec, 11 – Orange, 12 – Zambezi Delta, 13 – Morondawa, 14 – Ruwuma, 15 – Pemba Lamu, 16 – Somali (possibly non-diphthogenic);
rift intracontinental: 17 – Sirte, 18 – Termite, 19 – Salamat, 20 – Mujlat.

4. Влияние островного вулканизма на генерацию углеводородов

Считается, что кайнозойский «островной» вулканизм является одной из причин повышенных тепловых потоков в смежных эпифрифтовых

офшорных бассейнах раннего заложения [13]. Нельзя исключать, что этот фактор также сказался на формировании в этих бассейнах газовых месторождений, в частности за счет крекингового преобразования залежей нефти [15].

С незавершенностью такой регенерации могли быть связаны разрушение гиганских месторождений нефти и ее излияние на поверхность с образованием обширных полей асфальтитов Бемолонга и Тсимороро на Западе Мадагаскара. Такое предположение хорошо согласуется с данными трекового анализа по апатитам, согласно которым на заключительных этапах развития бассейна Морондава произошло повышение температуры до 90–100°, в первую очередь вдоль реактивированных разломов фундамента. Это событие совпало по времени с разогреванием недр остова, связанным с четвертичным вулканизмом, центры которого расположены вдоль его осевой зоны [16].

Хорошим примером связи процессов преобразования нефтяных залежей в месторождениях газа является западная область Северо-Африкан-

ской провинции платформенных бассейнов палеозоя-мезозоя. Данная провинция характеризуется преобладанием месторождений нефти. Исключение представляют южный и северный районы Алжира, в которых находятся многочисленные в том числе и крупные газовые месторождения [17]. Последние расположены вблизи кайнозойского центра вулканизма на нагорье Хоггара и Тель-Атласского альпийского пояса складчатости соответственно, характеризующихся повышенными тепловыми потоками [13]. Бесспорное влияние этих термоактивных структур на генерацию углеводородов близрасположенных бассейнах выражается в сосредоточении месторождений газа в пределах изотерм повышенных значений, находящихся в пространственной ассоциации с молодым вулканическим центром и альпидами (рис. 4).

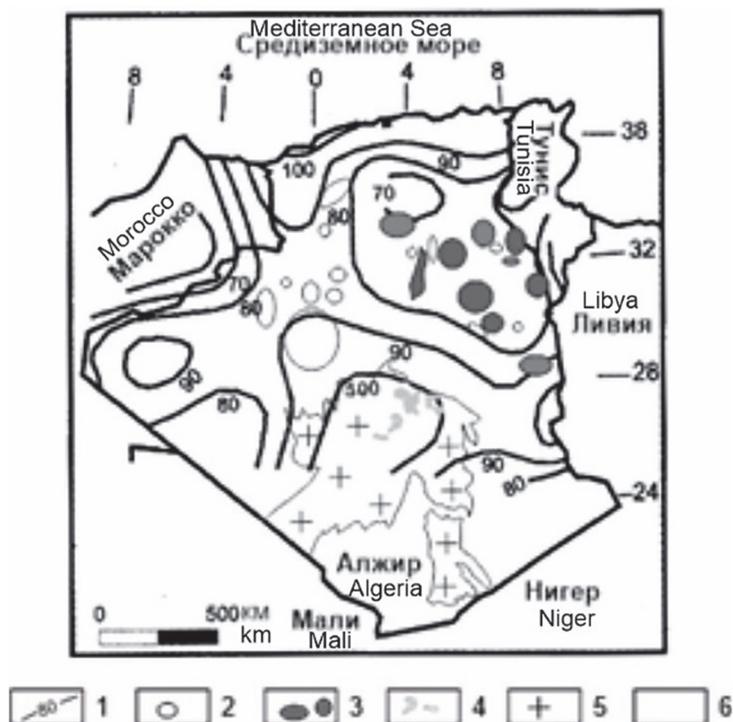


Рис. 4. Соотношение расположения месторождений нефти и газа в Алжире с тепловыми потоками [17]:

1 – изолинии тепловых потоков, мВ/м; 2 – месторождения газа; 3 – месторождения нефти; 4 – кайнозойские вулканиды нагорья Хоггара; 5 – выходы панафриканского фундамента; 6 – южная граница альпийского Тель-Атласского пояса складчатости

Figure 4. The ratio of the location of oil and gas fields in Algeria with heat flows [17]:

1 – isolines of heat flows, mV/m; 2 – gas fields; 3 – oil fields; 4 – Cenozoic volcanites of the Hoggar Highlands; 5 – outcrops of the Pan-African basement; 6 – the southern border of the Alpine Tel-Atlas folding belt

5. Обсуждение

В публикациях, относящихся к рифтовым бассейнам позднего фанерозоя Африки, развитие их нефтегазовых систем рассматривается в соответствии с традиционными моделями, кото-

рые предусматривают глубину, время погружения нефтематеринских отложений и температурные условия преобразования в них органических веществ. Однако причины неравномерности тепловых потоков, имеющих как это счита-

ются имеющие глубинное происхождение в таких моделях не рассматривается, что не дает полной картины геосторических связей нефтегазовой специализации бассейнов данного типа с их инфраструктурами. Выполненное исследование восполняет этот пробел. Оно показало, что генерация углеводородов в рифтогенных бассейнах Африки «незавершенного» и особенно «завершенного» развития зависело во многом от глубинных тепловых источников различной природы.

Заключение

Проведенное исследование показало, что нефтегазовая специализация осадочных бассейнов рифтогенного происхождения Африки коррелируется с их региональным положением и возрастом (временем заложения), определяемых особенностями панафриканских инфраструктур, а генерация углеводородов в бассейнах происходила при влиянии разных глубинных источников. Из последних общими являлись различные по интенсивности потоки тепломассопереноса из глубинных систем гранулитовых поясов разных размеров, в которых бассейны формировались. В бассейнах «завершенного» развития, перешедших в стадию переконтинентального прогибания, большое значение имело влияние «тепловых полей» рожденных в них океанов, а также мезозойского синседиментационного и кайнозойского островного магматизма.

Результаты исследования могут рассматриваться в качестве научной базы при прогнозной оценке рифтогенных бассейнов на обнаружение промышленных месторождений нефти или газа.

Список литературы / References

1. Dolginov EA, Davidenko IV, Stihotvorceva NA. *Geology and minerals of East Africa*. Moscow: Nedra Publ.; 1982. (In Russ.)
Долгинов Е.А., Давиденко И.В., Стихотворцева Н.А. Геология и полезные ископаемые Восточной Африки. М.: Недра. 1982. 230 с.
2. Modelevsky MS, Modelevsky MM. Assessment of the discovered and undiscovered oil and gas of Africa. *Russian Geology and Geophysics*. 2016;57(9):1342–1348. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.08.019>
Моделевский М.С., Моделевский М.М. Общая оценка нефтегазового потенциала Африканского континента // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 9. С. 1707–1714. <https://doi.org/10.15372/GiG20160909>
3. Brownfield ME, Charpentier RR. Geology and total petroleum systems of the Gulf of Guinea province of West Africa. *U.S. Geological Survey Bulletin*. 2006; 2207(C). <https://doi.org/10.3133/b2207C>
4. Muñoz-Barrera JM, Rotevatn A, Gawthorpe R, Henstra G, Kristensen T. The role of structural inheritance in the development of high-displacement crustal faults in the necking domain of rifted margins: The Klakk Fault Complex, Frøya High, offshore mid-Norway. *Journal of Structural Geology*. 2020;140:104–163. <https://www.doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104163>
5. Dolginov EA. On the problem of the origin of oceans. *Byulleten MOIP. Otdel Geologii*. 1979;54(1):22–46. (In Russ.)
Долгинов Е.А. К проблеме происхождения океанов // Бюллетень МОИП. Отдел Геологии. 1979. Т. 54. Вып. 1. С. 22–46.
6. Dolginov EA, D'Almeida JF. The relationship of Late Phanerozoic rifts with the structures of the Pre-Cambrian basement of the Arabian-African platform. *Geotektonika*. 2002;(5):23–31. (In Russ.)
Долгинов Е.А., Д'Альмейда Ж.Ф. Соотношение рифтов позднего фанерозоя со структурами докембрийского фундамента Аравийско-Африканской платформы // Геотектоника. 2002. № 5. С. 23–31.
7. Gillard M, Sauter D, Tugend J, Tomasi S, Epin M, Manatschal G. Birth of an oceanic spreading center at a magma-poor rift system. *Scientific Report*. 2017;7:15072. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15522-2>
8. Daszinnies MC. *The Phanerozoic thermo-tectonic evolution of Northern Mozambique constrained by 40Ar/39Ar, fission track and (U-Th)* (dissertation on obtaining the doctoral degree). Bremen; 2006.
9. Fritz H., Abdelsalam M., Ali K.A., Bingen B., Collins A.S., Fowler A.R., Ghebreab W., Hauzenberger C.A., Johnson P.R., Kusky T.M., Macey P., Muhongok S., Stern R.J., Viola G. Orogen styles in the East African Orogen: a review of the Neoproterozoic to Cambrian tectonic evolution. *Journal of African Earth Sciences*. 2013;86: 65–106. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.06.004>
10. Priestley K, McKenzie D, Debayle É, Pilidou S. The African upper mantle and its relationship to tectonics and surface geology. *Geophysical Journal International*. 2008;175:1108–1126. <https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.2008.03951.X>
11. Frezsimons CW. Pan-African granulites of Madagascar and southern India: Gondwana assembly and parallels with modern Tibet. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2016;111(2):73–88. <https://doi.org/10.2465/jmps.151117>
12. Khutorskoy MD. Depth of mantle plumes sources and its thermal regime. *Monitoring. Science & Technologies*. 2021;(3):20–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.49.003>
Хуторской М.Д. Глубина источников и тепловой режим мантийных плюмов // Мониторинг.

Наука и технологии. 2021. № 3 (49). С. 20–31. <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.49.003>

13. Macgregor D. Thermal anomalies across Africa: causes and effects on petroleum systems. *International Conference and Exhibition, Cape Town, South Africa, 4–7 November, 2018*. <https://doi.org/10.1306/11189Macgregor2019>

14. Brink AH. Petroleum geology of Gabon Basin. *AAPG Bulletin*. 1974;58:216–235. <https://www.doi.org/10.1306/83D913BC-16C7-11D7-8645000102C1865D>

15. Mahanjane ES, Franke D, Lutz R, Winsemann K, Reichert C. Maturity and petroleum systems modelling in the offshore Zambezi Delta depression and Angoche Basin,

Northern Mozambique. *Journal of Petroleum Geology*. 2014;37(4):329–348. <https://www.doi.org/10.1111/jpg.12589>

16. Pratt MJ, Wyssession ME, Aleqabi G, Wiens DA, Nyblade AA, Shore P, Rambolamanana G, Andriampenanana F, Tsiriandrimanana R, Tucker R, Barruol G, Rindrahariasona EJ. Shear velocity structure of the crust and upper mantle of Madagascar derived from surface wave tomography. *Earth and Planetary Sciences Letters*. 2016;458(2):405–417. <https://www.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.10.041>

17. Saibi H. Geothermal resources in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009;13:2544–2552. <https://www.doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.019>

Сведения об авторе

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, eLIBRARI SPIN-код: 1276-3570; usova-vm@rudn.ru

About the author

Valentina M. Usova, senior lecturer, Department of Geology, Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0023-5913, Scopus Author ID: 57205576129, eLIBRARI SPIN-code: 1276-3570; usova-vm@rudn.ru