



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

Том 19 № 1 (2018)

DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-1

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

Научный журнал

Издается с 2000 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.  
Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

### Главный редактор

**Разумный Юрий Николаевич**, директор Инженерной академии РУДН, директор департамента механики и мехатроники института космических технологий Инженерной академии РУДН, Академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, Академик Международной академии астронавтики, доктор технических наук, профессор

### Заместитель главного редактора

**Резник Сергей Васильевич**, заведующий кафедрой НУК «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктор технических наук, профессор

### Ответственный секретарь

**Ткаченко Ирина Михайловна**, доцент департамента механики и мехатроники Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук

### Члены редакционной коллегии

**Алифанов Олег Михайлович** — член-корреспондент Российской академии наук, заведующий кафедрой космических систем и ракетостроения, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт

**Галшицкова Вера Владимировна** — доктор технических наук, директор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии Российского университета дружбы народов

**Георгиевский Алексей Федорович** — профессор департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор геолого-минералогических наук

**Давыдов Василий Андреевич** — профессор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор физико-математических наук

**Данилов Игорь Кеворкович** — директор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук

**Дивеев Асхат Ибрагимович** — заведующий сектором проблем кибернетики федерального исследовательского центра информатики и управления Российской академии наук, доктор технических наук, профессор

**Забудский Евгений Иванович** — профессор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук

**Задранов Александр Никитович** — профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук

**Захаров Валерий Николаевич** — член-корреспондент Российской академии наук, директор Института проблем комплексного освоения недр Российской академии наук

**Иванов Виталий Александрович** — академик Российской академии ракетных и артиллерийских наук, Михайловская военная артиллерийская академия, доктор технических наук, профессор

**Иванов Вячеслав Николаевич** — профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук

**Калугин Владимир Тимофеевич** — руководитель Научно-учебного комплекса специального машиностроения Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, доктор технических наук, профессор

**Копилов Владимир Николаевич** — профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии Российского университета дружбы народов, доктор технических наук

**Корицкая Анна Владимировна** — профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии Российского университета дружбы народов, доктор технических наук

**Кривошапко Сергей Николаевич** — профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук

**Купреев Сергей Алексеевич** — профессор департамента механики и мехатроники Инженерной академии Российского университета дружбы народов, доктор технических наук

**Мальшев Вениамин Васильевич** — заведующий кафедрой системного анализа Московского авиационного института, доктор технических наук, профессор

**Малькова Марианна Юрьевна** — профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук

**Мельников Виталий Михайлович** — профессор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук

**Омельченко Ирина Николаевна** — декан факультета инженерного бизнеса и менеджмента Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор

**Патрахальцев Николай Николаевич** — профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук

**Попов Гарри Алексеевич** — академик Российской академии наук, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института, доктор технических наук, профессор

**Рыльникова Марина Владимировна** — главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, доктор технических наук, профессор

**Свищов Александр Петрович** — профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук

**Фомин Валерий Михайлович** — профессор кафедры автомобильных и тракторных двигателей, Московский государственный машиностроительный университет, доктор технических наук

**Агравал Бридж** — профессор Навал Постградуэйт Скул, Монтерей, США

**Варатараджу Ренугант** — профессор Университета Путра Малайзия, Малайзия

**Герман Анна** — профессор Университета Бейра Интериор, Португалия

**Грациани Филиппо** — профессор Римского университет «Ла Сапиенца», Италия

**Мисра Арун** — профессор Университета МакГилл, Канада  
**Мортари Даниэль** — профессор Техасского университета A&M, США

**Спенсер Дэвид** — профессор Университета Пенн Стейт, США  
**Фурфаро Роберто** — профессор Университета Аризоны, США

**Ясика Тетсуо** — профессор Эмеритус, Университет Кюсю, Япония

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

ISSN 2312-8151 (online); ISSN 2312-8143 (print)

Периодичность 4 выпуска в год.

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

Языки: русский, английский.

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

Включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК при Минобрнауки России по группе научных специальностей: 05.02.00 — машиностроение и машиноведение; 05.23.00 — строительство и архитектура; 25.00.00 — науки о Земле (по состоянию на 29.01.2018).

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» — 18230.

### **Цель и тематика**

В журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных научных исследований российских и зарубежных ученых по направлениям информатика, вычислительная техника, архитектура и строительные науки, машиностроение и материаловедение, геология, горное и нефтегазовое дело, науки о Земле.

Научный журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» адресован научным работникам, инженерам, аспирантам, студентам старших курсов технических вузов.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде доступны в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) на платформе Научной электронной библиотеки (НЭБ) eLibrary.ru, а также на сайте журнала <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>.

---

Редактор: *М.П. Малахов*  
Компьютерная верстка: *О.Г. Горюнова*

**Адрес редакции:**  
ул. Орджоникидзе, д. 3, Москва, Россия, 115419  
Тел.: (495) 955-07-16; e-mail: [ipk@rudn.university](mailto:ipk@rudn.university)

**Адрес редакционной коллегии серии «Инженерные исследования»:**  
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419  
Тел.: (495) 955-07-92; e-mail: [engjournalrudn@rudn.university](mailto:engjournalrudn@rudn.university)

---

Подписано в печать 15.10.2017. Выход в свет 30.10.2017. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «NewtonС».

Усл. печ. л. 11,29. Тираж 500 экз. Заказ № 10. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет дружбы народов» (РУДН)  
117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН  
115419, Москва, Россия, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. (495) 952-04-41; e-mail: [ipk@rudn.university](mailto:ipk@rudn.university)



## RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

VOLUME 19 NUMBER 1 (2018)

DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-1

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

Founded in 2000

Founder: PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY OF RUSSIA

### EDITOR-IN-CHIEF

*Yury N. Razumny*, Director of the Academy of Engineering of RUDN; Director of the Department of Mechanics and Mechatronics, Institute of Space Technologies, Academy of Engineering, RUDN University; Member of Russian Academy of Cosmonautics; Member of International Academy of Astronautics (IAA); Professor

### ASSOCIATE EDITOR-IN-CHIEF

*Sergey V. Reznik*, the Head of the Department of "Special Engineering" MSTU. N.E. Bauman, Professor

### ASSISTANT TO THE EDITOR-IN-CHIEF

*Irina M. Tkachenko*, associate Professor, Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering of RUDN University

### EDITORIAL BOARD

*Oleg M. Alifanov* — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Space Systems and Missile Design, Moscow Aviation Institute

*Vera V. Galishnikova* — Director of the Department of architecture and civil engineering, Engineering Academy, RUDN University, Associate Professor

*Aleksei F. Georgievskii* — Professor of the Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Professor  
*Vasilii A. Davydov* — Professor of the Department of Mechanics and Mechatronics, Engineering Academy, RUDN University, Professor

*Igor' K. Danilov* — Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Professor

*Askhat I. Diveev* — Head of the sector of problems of cybernetics of Federal Research Center "Informatics and Control" of the Russian Academy of Sciences, Professor

*Evgenii I. Zabudskii* — Professor of the Department of Mechanics and Mechatronics, Engineering Academy, RUDN University, Professor

*Aleksandr N. Zadiranov* — Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Professor

*Valery N. Zaharov* — Director of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor

*Vitalii A. Ivanov* — Academician of Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Professor

*Vyacheslav N. Ivanov* — Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Professor

*Vladimir T. Kalugin* — Dean of the Departments of Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Professor

*Vladimir N. Konoplev* — Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Professor

*Anna V. Kornilova* — Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Associate Professor

*Sergei N. Krivoshapko* — Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Professor

*Sergey A. Kupreev* — Professor of the Department of Mechanics and Mechatronics, Academy of Engineering, RUDN University, Associate Professor

*Veniamin V. Malyshev* — Head of the Department of System Analysis, Moscow Aviation Institute, Professor

*Marianna Y. Mal'kova* — Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Associate Professor

*Irina N. Omelchenko* — Dean of the Department of Engineering business and management, Bauman Moscow State Technical University, Professor

*Nikolai N. Patrakhal'tsev* — Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Professor

*Harri A. Popov* — Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute, Member of the Russian Academy of Sciences

*Marina V. Rylnikova* — Chief Researcher of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface of the Russian Academy of Sciences, Professor

*Aleksandr P. Svintsov* — Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Professor

*Valeriy M. Fomin* — Moscow Polytechnic University, Professor  
*Brij Agrawal* — Naval Postgraduate School, Monterey, USA, Professor

*Renuganth Varatharajoo* — University Putra Malaysia, Malaysia, Professor

*Anna Guerman* — Universidade da Beira Interior, Portugal, Professor

*Filippo Graziani* — University Roma "La Sapienza", Italy, Professor

*Arun Misra* — McGill University, Canada, Professor

*Daniele Mortari* — Texas A&M University, USA, Professor

*David Spencer* — Penn State University, USA, Professor

*Roberto Furfaro* — University of Arizona, USA, Associate Professor

*Tetsuo Yasaka* — Kyushu University, Japan, Professor Emeritus

**RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES.**  
**Published by the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow**

ISSN 2312-8151 (online); ISSN 2312-8143 (print)

Published 4 times a year.

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

Languages: Russian, English

Indexed by Ulrich's Periodicals Directory, RSCI (elibrary.ru), Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View.

**Aim and Scope**

The journal publishes results of fundamental and applied research of Russian and foreign scientists on specific scientific research themes. The editorial Board of the journal invites the cooperation of experts working in the areas of computer science, computer engineering, architecture and construction sciences, mechanical engineering and materials science, geology, mining and petroleum engineering, earth science.

The scientific journal "RUDN Journal of Engineering Researches" is addressed to researchers, engineers, graduate students, senior students of polytechnical universities.

The Journal has been included in the list of the leading review journals and editions of the Highest Certification Committee of 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>. The website contains full information about the Journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, etc., as well as full-text issues of the Journal since 2008 (Open Access).

---

Editor *M.P. Malakhov*

Computer design: *O.G. Gorunova*

**Address of the editorial board:**

Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

Ph. +7 (495) 955-07-16; e-mail: [ipk@rudn.university](mailto:ipk@rudn.university)

**Address of the editorial board Series "Engineering researches":**

Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

Ph. +7 (495) 955-07-92;

e-mail: [engjournalrudn@rudn.university](mailto:engjournalrudn@rudn.university)

---

Printing run 500 copies. Open price.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Peoples' Friendship University of Russia"

6 Miklukho-Maklaya str., 117198 Moscow, Russia

**Printed at RUDN Publishing House:**

3 Ordzhonikidze str., 115419 Moscow, Russia,

Ph. +7 (495) 952-04-41; e-mail: [ipk@rudn.university](mailto:ipk@rudn.university)

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- Бодня И.С., Тимошенко В.П.** Численное моделирование тепловых режимов передней кромки крыла возвращаемого космического аппарата ..... 7
- Быков Л.В., Пашков О.А., Правидло М.Н., Янышев Д.С.** Математическое моделирование аэродинамической интерференции между отделяемой полезной нагрузкой и самолетом-носителем ..... 22

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Белоусов Ю.В.** Расчет погрешности закрепления при установке заготовок на опоры приспособления ..... 38
- Рожкова Е.А., Четвериков С.В.** Методика проведения экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния профильных соединений с натягом..... 46
- Пономарев Н.К., Щесняк Л.Е.** К вопросу о гидравлическом расчете основных параметров продольно-циркуляционных течений ..... 59

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Дивеев А.И., Константинов С.В.** Задача оптимального управления и ее решение эволюционным алгоритмом «серого волка»..... 67

### ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО. НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И.** Особенности конструирования систем подземного выщелачивания металлов ..... 80
- Малькова М.Ю., Задиранов А.Н.** Высокотемпературный обжиг руды месторождения Томтор и его особенности ..... 92
- Гуськова И.А., Леванова Е.В., Белошарпа И.Е.** Анализ эффективности нестационарного отбора с использованием оптических и хроматографических методов..... 102
- Дьяконов В.В., Котельников А.Е., Жорж Н.В.** Палеоструктура восточного Оренбуржья ..... 112
- Марков В.Е., Васильев Н.П., Карепина К.В., Карелина Е.В.** Использование микроструктурного анализа для прогноза морфологии и пространственного расположения хромитовых тел ..... 119
- Малюков В.П., Токарев И.С.** Исследования разработки Нанкайского газогидратного месторождения ..... 127

## CONTENTS

### AEROSPACE ENGINEERING

- Bodnya I.S., Timoshenko V.P.** Numerical modeling of a wing leading-edge thermal regimes for a reusable space vehicle ..... 7
- Bykov L.V., Pashkov O.A., Pravidlo M.N., Yanyshv D.S.** Numerical simulation of aerodynamic interference between ejected payload and the parent aircraft ..... 22

### MECHANICAL ENGINEERING AND MATERIAL SCIENCE

- Belousov Yu.V.** Calculation of clamping error when mounting a workpiece on fixture supports ..... 38
- Rozhkova E.A., Chetverikov S.V.** Technique for conducting experimental studies on stress-strain state of P-3 profile interference fits ..... 46
- Ponomarev N.K., Schesnyak L.E.** On hydraulic analysis of the main parameters of longitudinal-circulating flow ..... 59

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTATIONAL ENGINEERING AND CONTROL

- Diveev A.I., Konstantinov S.V.** Optimal control problem and its solution by grey wolf optimizer algorithm ..... 67

### GEOLOGY, MINING AND OIL&GAS ENGINEERING. EARTH SCIENCE

- Golik V.I., Razoryonov Yu.I., Lyashenko V.I.** Special features of constructing systems for underground leaching of metals ..... 80
- Malkova M.Yu., Zadiranov A.N.** A study on kinetics of roasting of ore from tomto field ..... 92
- Guskova I.A., Levanova E.V., Beloshapka I.E.** Optical and chromatographic methods for efficiency analysis of non-stationary production ..... 102
- Diakonov V.V., Kotelnikov A.E., Zhorzh N.V.** Paleosturkture of East Orenburg region ..... 112
- Markov V.E., Vasiliev N.P., Karepina K.V., Karelina E.V.** Microstructural analysis for predicting the morphology and spatial arrangement of chromite bodies ..... 119
- Malukov V.P., Tokarev I.S.** Research on the development of the Nankai gas hydrates field ..... 127



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-7-21

УДК 536.244

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ КРЫЛА ВОЗВРАЩАЕМОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

И.С. Бодня, В.П. Тимошенко

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)

*Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5/1*

На протяжении всей истории освоения людьми космического пространства, ведутся работы по снижению стоимости вывода грузов в космос. Одним из технически реализуемых решений для достижения этой цели является использование малоразмерных многоразовых аэрокосмических аппаратов. Для обеспечения тепловой защиты конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов применяются современные термостойкие композитные покрытия. В данной работе представлена оценка возможности выполнения кромки крыла из термостойкой пористой керамики на основе волокон  $Al_2O_3$ . В связи с пористой структурой подобной теплозащиты, показана необходимость принимать во внимание влияние внешнего давления воздуха на теплопроводность материала. Предложена расчетная математическая модель, позволяющая учитывать зависимость теплопроводности пористого теплозащитного материала передней кромки крыла аэрокосмического аппарата от температуры и давления, при его спуске в атмосфере. На основе анализа поля температур внутри кромки крыла определена минимальная толщина теплозащитного покрытия исходя из максимально допустимой рабочей температуры силовой конструкции. Показано, что термостойкая пористая керамика на основе волокон  $Al_2O_3$  способна обеспечить необходимую тепловую защиту силовой конструкции, температура которой не превышала  $250\text{ }^\circ\text{C}$  на всей траектории полета.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, передняя кромка крыла, композитный материал, пористая керамика, волокна  $Al_2O_3$ , тепловая защита, малоразмерный аэрокосмический аппарат, тепловой поток

### Введение

На протяжении всей истории освоения людьми космического пространства, ведутся работы по снижению стоимости вывода грузов в космос. Одним из технически реализуемых решений для достижения этой цели новых направлений в освоении околоземного космического пространства является использование малоразмерных многоразовых аэрокосмических аппаратов (МКА) «крылатого» типа [1; 2].

Для обеспечения тепловой защиты конструкции данных аппаратов применяются современные термостойкие композитные покрытия. Так, беспилотный аэрокосмический аппарат Х-37 (рис. 1), имеет теплозащитную конструкцию передней кромки крыла, частью которой служит материал АЕТВ-8 (Alumina Enhanced

Thermal Barrier), представляющий собой высокопористую керамику на основе волокон оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), кремния и алюминий-боросиликатных волокон [3; 4]. Теплозащитное покрытие (ТЗП) аппарата способно выдерживать температуры до 1970 К [5].



**Рис. 1.** Многоразовый космический аппарат X-37 [6]  
**[Fig. 1.** X-37 reusable space vehicle [6]]

Во многих других космических кораблях также используют композитные материалы в качестве ТЗП (табл. 1).

Таблица 1

**Перечень материалов передних кромок малоразмерных аппаратов «крылатого» типа**  
**[List of wing leading-edge materials for “winged” small-sized space vehicles]**

Название космического аппарата	Год запуска	Страна	Особенности конструкции передней кромки крыла
БОР 4 [7; 8]	1982—1984	СССР	ПКТ-ФЛ (уносимая) из фенол-формальдегидной ткани, пропитанной смесью фенол-формальдегидных смол; между верхней и нижней поверхностями крыльев также находился материал типа фетр, пропитанный специальным составом на основе воды. Испарение воды обеспечивало эффективное охлаждение во время интенсивного нагрева. Характерный размер кромки: 70—80 мм. Максимальная рабочая температура: до 1700 °С
Бор 5 [7; 8]	1984—1988	СССР	молибденовый сплав и дополнительное антиокислительное покрытие. К кромке из молибденового сплава крепился ТЗП на основе кварцевого волокна и хром-алюминий-фосфатного связующего. Характерный размер кромки: ≈ 100 мм. Максимальная рабочая температура: до 2000 °С
X-33 [8—10]	Отсутствует	США, НАСА и др.	Углерод-углеродный материал
X-34 [11]	Отсутствует	США	Многоразовая теплозащитная плитка на основе Кремниевой керамики
X-38 [12; 13]	Отсутствует	NASA, ESA	Карбидокремниевая керамика
Hermes [8; 14]	Отсутствует	Европейские страны, Россия, Канада и др.	Углеродный носок (C/SiC) — высокопрочный углеродный материал типа «Карбоксил» в виде оболочки толщиной 3 мм, подкрепленной поперечными ребрами толщиной 6 мм
Skylon [15; 16]	В разработке	ESA	Углерод — углеродный материал. Композитная внутренняя силовая конструкция крыльев

В ряде перспективных аппаратов «крылатого» типа, созданных для совершения орбитальных полетов на низкой околоземной орбите (НОО), также следует отметить аппараты FTB-1 (Italian Aerospace Research Centre) и DreamChaser (Sierra Nevada Corporation) (рис. 2).



**Рис. 2.** Космические аппараты: а — FTB-1; б — DreamChaser [17; 18]  
[Fig. 2. Space vehicles: a — FTB-1; б — DreamChaser [17; 18]]

На первом аппарате, для кромки малого радиуса ( $R = 0,04$  м), планируется использование высокотемпературной керамики (УНТС) на основе  $ZrB_2$  или  $SiC$  [19–21]. Однако ТЗП аппарата DreamChaser, ввиду большего радиуса кромки крыла, также, как и на X-37, выполнено из материала АЕТВ-8 [22]. Как было отмечено, этот материал имеет пористую структуру, а, следовательно, меньшую плотность, что позволяет значительно улучшить весовые характеристики ТЗП по сравнению с УНТС.

### Материалы и допущения

Приведенные сведения доказывают высокий интерес космической индустрии к композитам, а именно к пористой керамике как к современному теплозащитному материалу передней кромки крыла МКА.

Цель данного исследования состоит в оценке возможности выполнения передней кромки крыла МКА из термостойкой пористой керамики на основе волокон оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) [23] (табл. 2).

Таблица 2

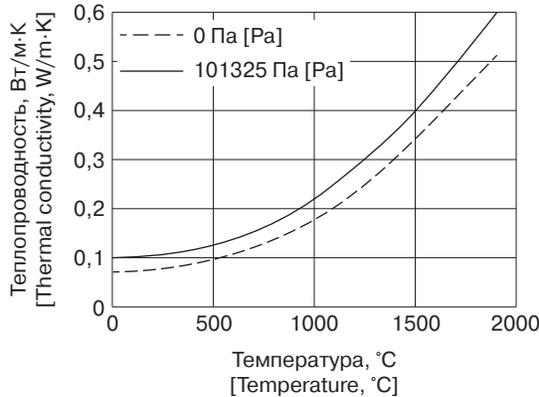
**Основные характеристики пористой керамики на основе  $Al_2O_3$**   
[List of properties for porous  $Al_2O_3$  based ceramics]

Материал	Структура	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоемкость, Дж/кг·К
ТЗМК1700 [23]	Пористая (термические характеристики зависят от давления)  Матрица: кремнийорганическое связующее  Волокна: $Al_2O_3$	250	Давление $10^{-5}$ Па: 0,07 (при 20 °С) — 0,43 (при 1700 °С) Давление $10^5$ Па (1 атм.): 0,1 (при 20 °С) — 0,5 (при 1700 °С)	680 (при 20 °С) — 1260 (при 1700 °С)

Представлена математическая модель, с помощью которой проводился анализ для наиболее теплонагруженного участка траектории — входа космического аппарата в атмосферу. Основным критерием для оценки ТЗП была максимальная

температура силовой конструкции, выполненная из термостойкого углепластика. На протяжении всей траектории полета эта температура не должна превышать значений в пределах 250–300 °С [24].

В связи с пористой структурой материала, его теплопроводность значительно меняется ( $\approx 30\%$  в интервале от  $10^{-5}$  Па до  $10^5$  (1 атм.) в зависимости от давления воздуха внутри материала (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимость теплопроводности материала от температуры и давления  
[Fig. 3. Temperature and pressure dependence of the porous material]

Исходя из особенностей свойств материала и теплового нагружения, в представленной математической модели использовались следующие допущения:

- 1) давление воздуха внутри теплозащитного материала кромки считалось близким к статическому атмосферному давлению на высоте полета;
- 2) тепловой поток на всей поверхности кромки считается ламинарным;
- 3) температура конструкции при  $t = 0$  с (т.е. перед началом спуска с орбиты 150 км) принималась равной 30 °С;
- 4) излучательная способность внешней поверхности кромки принималась равной  $\epsilon = 0,8$  [25].

### Расчетная математическая модель

Для определения рациональной конструкции кромки была разработана математическая модель в пакете конечно-элементного (КЭ) анализа ANSYS Transient Thermal 16.2. С помощью программного кода ADPL (Ansys Parametric Design Language), учитывалась зависимость теплопроводности материала от температуры и давления,  $\lambda = f(T, P)$ , на всей траектории спуска. Функция  $f(T, P)$  задавалась эмпирическим уравнением, с помощью кривых теплопроводности для двух крайних значений давления ( $\approx 0$  Па и  $10^5$  Па) по формуле [26]

$$\lambda(T, P) = \lambda_1(T) - \frac{\lambda_1(T) - \lambda_0(T)}{1 + 0,656 \cdot 10^{-3} \cdot P \left( 1 + \frac{124}{T + 273} \right)},$$

где  $T$  — температура в данной точке материала, °С;  $P$  — атмосферное давление в данный момент времени, Па;  $\lambda_1$  — теплопроводность при  $P = 10^5$  Па, Вт/м·К;  $\lambda_0$  — теплопроводность при  $P \approx 0$  Па, Вт/м·К.

Нестационарный тепловой анализ проводился для времени полета  $t_{\text{общ}} = 2870$  мин = 47,8 мин с шагом по времени в 1 с. Изменение свойств материала, а именно  $\lambda = f(T, P)$  по формуле, задавалось с помощью метода Singleframe Restart в программе КЭ анализа. Программа, сохранив результаты расчета после временного шага, обращалась в препроцессор (PREP7), где перезаписывались кривые теплопроводности материала,  $\lambda = f(T)$ , характерные для новой точки на траектории (т.е. нового атмосферного давления) и расчет продолжался для нового значения времени.

Граничными условиями модели были конвективный тепловой поток,  $q_{\text{конв}}$ , излучаемый радиационный поток,  $q_{\text{рад}}$ , а также адиабатические стенки, которыми считались внутренние части силовой конструкции (рис. 4). Подводимый конвективный тепловой поток,  $q$ , считался ламинарным и задавался функцией координат  $x$ ,  $y$  и времени спуска аппарата,  $t$ .

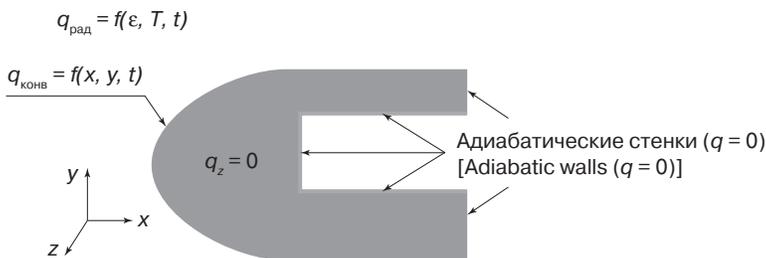
Для определения  $q$  в окрестности критической точки для заданного угла,  $\theta$ , при ламинарном режиме обтекания использовалась формула (рис. 5)

$$\frac{q(\theta)}{q_0} = 0,55 + 0,45 \cos(2\theta) \text{ при } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2},$$

где  $q_0$  — плотность теплового потока в критической точке, Вт/м<sup>2</sup>, определялась из эмпирической формулы Фэя — Риддела [27; 28]:

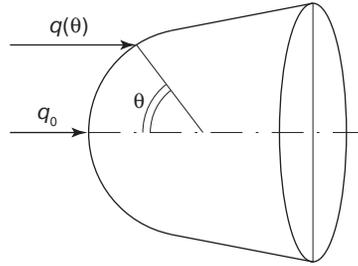
$$q_0 = \frac{2,56 \cdot 10^{-5}}{h_e} \sqrt{\frac{\rho_\infty}{R}} V_\infty^{3,25} (h_e - h_w),$$

где  $\rho_\infty$  — плотность потока, кг/м<sup>3</sup>;  $V_\infty$  — скорость аппарата, м/с;  $h_e$  — энтальпия восстановления, Дж/кг;  $h_w$  — энтальпия газа при температуре стенки, Дж/кг;  $R$  — радиус закругления носка, м.



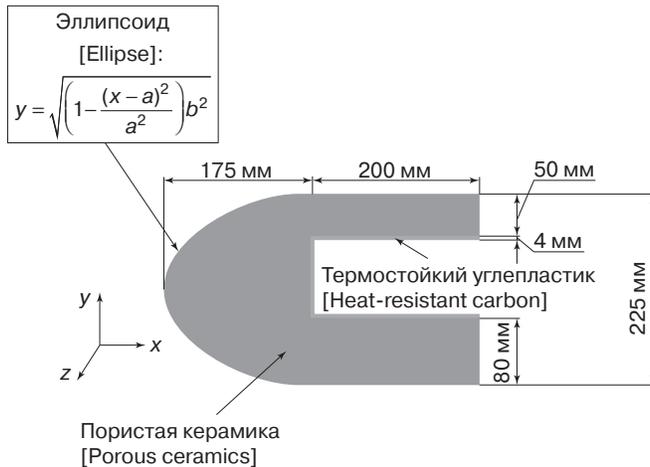
**Рис. 4.** Схема теплового нагружения передней кромки крыла МКА  
[Fig. 4. Boundary conditions of the RSV wing leading-edge]

Плотность радиационного теплового потока определялась при постоянном значении  $\epsilon = 0,8$  и температуре,  $T$ , в определенной точке поверхности в момент времени  $t$  (см. рис. 4).



**Рис. 5.** Схема теплового потока на поверхности кромки  
**[Fig. 5.** Surface heat flux distribution schematics]

Плотности теплового потока были рассчитаны для кромки крыла аппроксимированной уравнением эллипсоида (рис. 6). Геометрия ТЗП представляла собой объемную форму постоянной толщиной в 0,05 м (см. рис. 6). Теплозащитное покрытие крепилось к силовой конструкции из углепластика с теплопроводностью 3,3 Вт/м·К, плотностью 1600 кг/м<sup>3</sup> и теплоемкостью 1200 Дж/кг·К [29]. Толщина ТЗП в верхней и нижней зонах (50 мм и 80 мм) определялось исходя из максимально допустимой рабочей температуры термостойкого углепластика в пределах 250–300 °С [24]. Как будет описано далее, меньшая толщина ТЗП на подветренной части кромки связана с меньшим значением теплового потока в данной зоне.

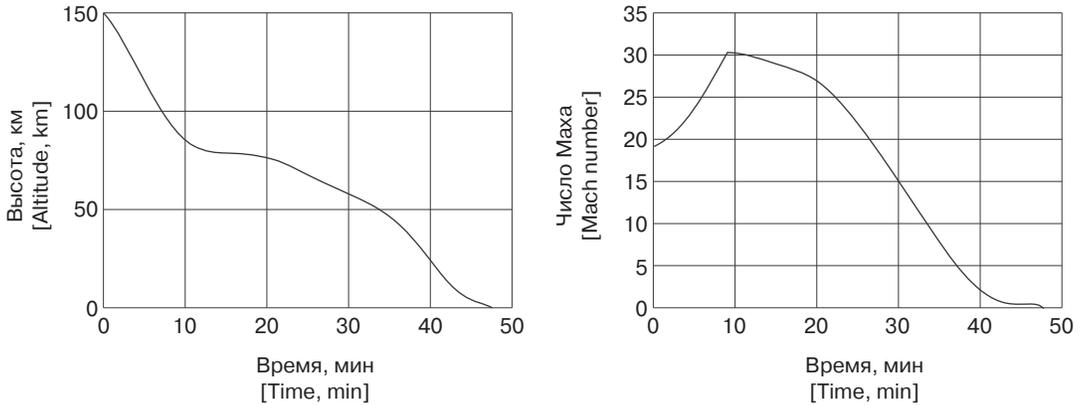


**Рис. 6.** Геометрия передней кромки крыла аппарата  
**[Fig. 6.** Leading-edge geometry schematic]

### Результаты моделирования

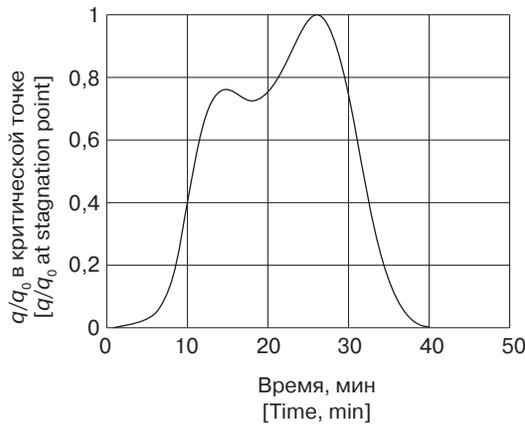
Тепловое нагружение кромки определялось для траектории аэрокосмического аппарата схожей с полетом таких кораблей как Буран, Space Shuttle, БОР 4, БОР 5, Х-37 [7; 30]. Законы изменения высоты и скорости по времени спуска показаны на рисунке 7.

Были рассмотрены максимальные тепловые нагрузки, которые имеют место быть при углах атаки в 0 и 40° для верхней и нижней поверхностей кромки, соответственно.



**Рис. 7.** Изменение высоты и скорости аэрокосмического аппарата со временем  
[**Fig. 7.** Height and Mach number vs. time plots]

Расчеты показали, что наиболее интенсивный нагрев кромки поверхности происходит при  $t = 26$  мин (рис. 8). Максимальная температура в критической точке в этот момент времени достигает значений в  $1735^{\circ}\text{C}$ .

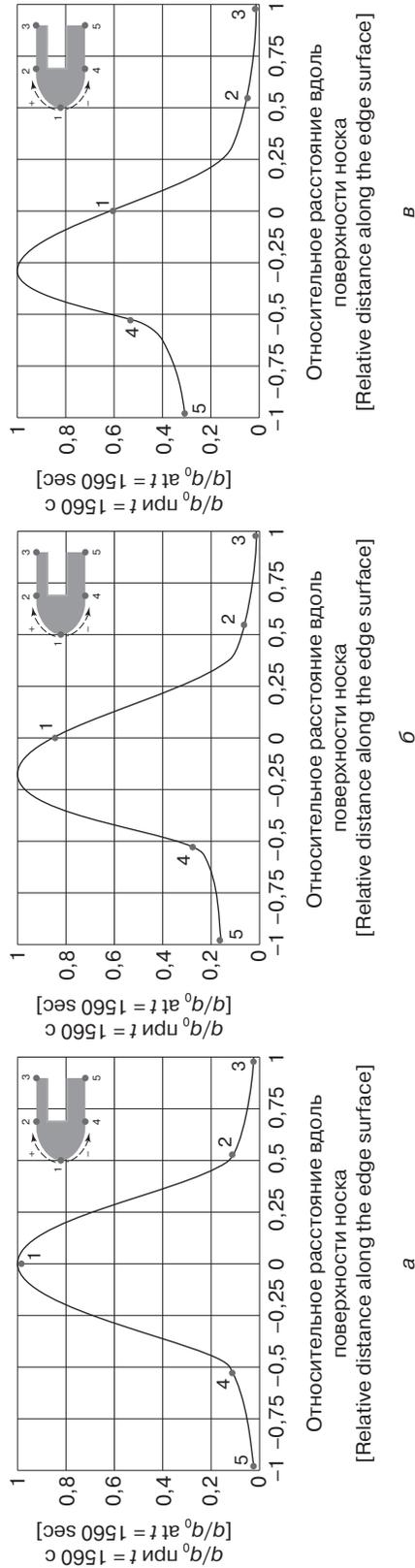


**Рис. 8.** Изменение плотности теплового потока во времени  
[**Fig. 8.** Heat flux vs. time variation at stagnation point]

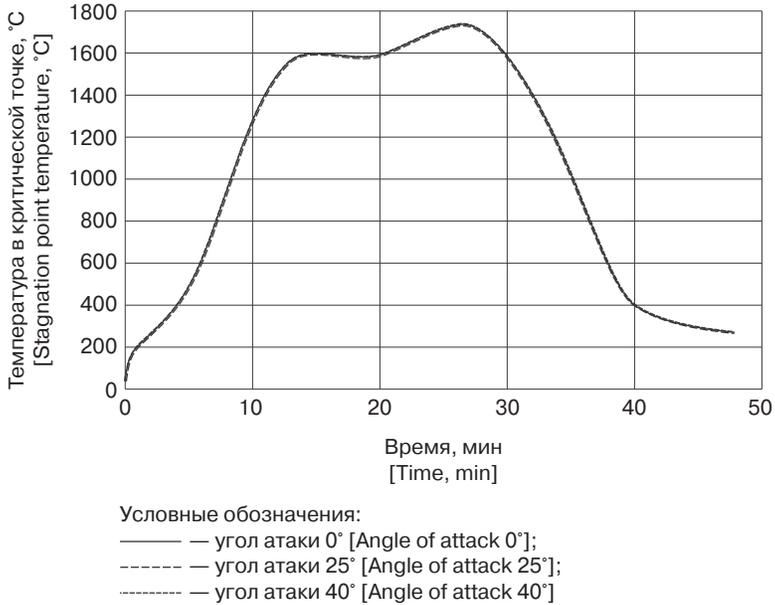
В зависимости от угла атаки, координаты критической точки смещаются в сторону наветренной стороны носка. Изменение плотности теплового потока вдоль поверхности при  $t = 26$  мин для разных углов атаки показано на рисунке 9.

Однако не зависимо от изменения положения критической точки вдоль кромки крыла, значение ее максимальной температуры не претерпевает существенных изменений (рис. 10).

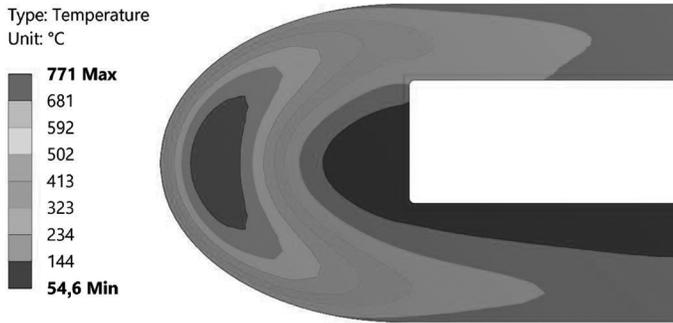
Результаты расчетов свидетельствуют, что изменение угла атаки в большей степени оказывает влияние на распределение температуры внутри конструкции. С его увеличением наблюдается рост температуры на нижней поверхности кромки, что, как следствие, требует большей толщины ТЗП в этой зоне. Поля температур в последний момент времени,  $t = 47,8$  мин, для углов атаки  $0^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$  и  $40^{\circ}$  приведены на рисунках 11–13, соответственно.



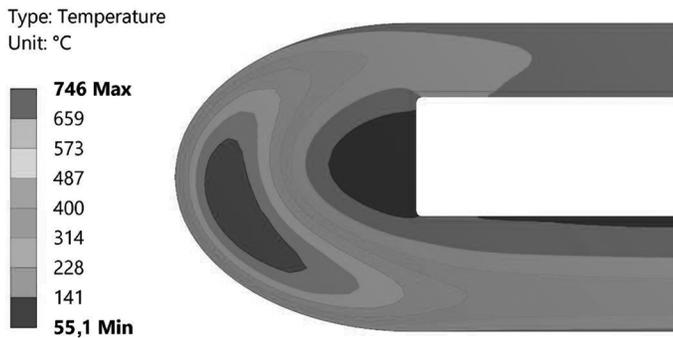
**Рис. 9.** Плотность теплового потока вдоль поверхности при углах атаки 0° (а), 25° (б) и 40° (в)  
 [Fig. 9. Surface heat flux distribution for angles of attack of 0° (а), 25° (б) and 40° (в)]



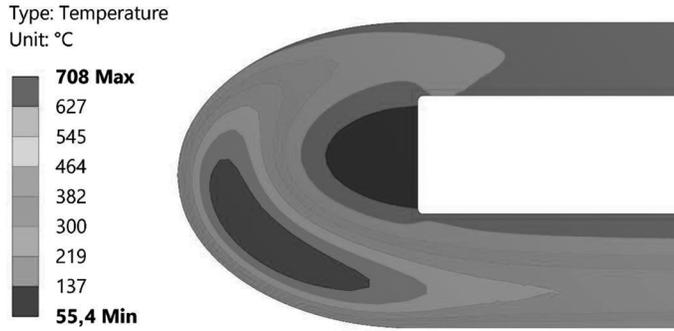
**Рис. 10.** Зависимость изменения температуры в критической точке со временем для различных углов атаки  
[**Fig. 10.** Temperature vs. time variation for stagnation point for various angles of attack]



**Рис. 11.** Поле температур при  $t = 47,8$  мин для угла атаки 0°  
[**Fig. 11.** Temperature field at  $t = 47,8$  min for 0 degrees angle of attack]

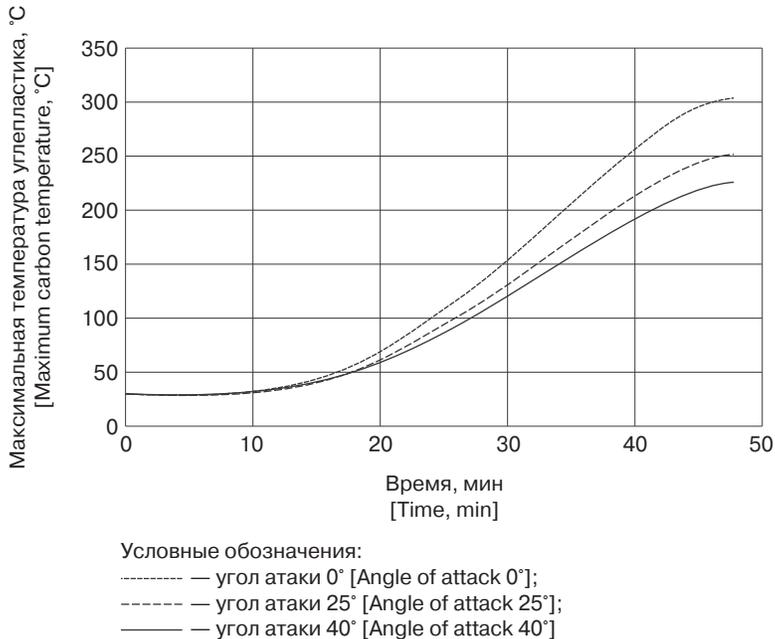


**Рис. 12.** Поле температур при  $t = 47,8$  мин для угла атаки 25°  
[**Fig. 12.** Temperature field at  $t = 47,8$  min for 25 degrees angle of attack]



**Рис. 13.** Поле температур при  $t = 47,8$  мин для угла атаки  $40^\circ$   
[**Fig. 13.** Temperature field at  $t = 47,8$  min for  $40$  degrees angle of attack]

Для определения влияния угла атаки на температуру силовой конструкции были построены зависимости максимальной температуры углепластика от времени полета (рис. 14).



**Рис. 14.** Изменения максимальной температуры силовой конструкции во времени для углов атаки  $0^\circ$ ,  $25^\circ$  и  $40^\circ$   
[**Fig. 14.** Support structure maximum temperature vs. time for  $0^\circ$ ,  $25^\circ$  and  $40^\circ$  angles of attack]

## Выводы

Результаты математического моделирования свидетельствуют, что максимальная температура силовой конструкции из углепластика не превышает  $225^\circ\text{C}$  и  $250^\circ\text{C}$  при углах атаки в  $42^\circ$  и  $25^\circ$ , соответственно. Следует отметить, что, как правило, полет МКА совершается при углах атаки в пределах от  $42^\circ$  до  $7^\circ$ . Максимальная тепловая нагрузка же имеет место еще в более узком интервале от  $42^\circ$

до 25° [30]. Из этого следует, что действительная температура силовой конструкции будет иметь максимальное значение, не превышающее  $\approx 250$  °С. Однако в реальных условиях, при наличии излучения во внутреннюю полость крыла, ожидается дополнительное снижение температуры силовой конструкции на 5–10%. Следовательно, максимальная температура силовой конструкции на всей траектории полета будет находиться в пределах рабочих температур термостойкого углепластика до 300 °С [24].

Из полученных результатов сделан вывод, что пористая керамика на основе волокон  $Al_2O_3$  способна обеспечить необходимую тепловую защиту корабля для заданной траектории и скорости полета.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Dumbacher D. NASA's Second Generation Reusable Launch Vehicle Program Introduction, Status and Future Plans // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Huntsville, Alabama: AIAA, 2002. № July.
- [2] Wang Z., Huang S., Shen L., Zhou H., Zhi J. Conceptual evaluation of multi-purpose aerospace plane // Russian-American scientific journal: Actual problems of aviation and aerospace systems: processes, models, experiment. Nanjing, China. 2014. Vol. 1. No. 38. P. 45–57.
- [3] Johnson S.M. Thermal Protection Materials: Development, Characterization and Evaluation. Munich, Germany, 2012. 53 p.
- [4] Daryabeigi K., Knutson J.R., Cunnington G.R. Heat Transfer Measurement and Modeling in Rigid High-Temperature Reusable Surface Insulation Tiles // AIAA. 2011. T. 345. C. 2011.
- [5] Nanowick L., Flow C. Lightweight Thermal Protection System for Atmospheric Entry // NASA Tech Briefs. 2007. № October 2007. C. 20–21.
- [6] Desarrollo y Defensa [Электронный ресурс]. URL: [http://desarrolloydefensa.blogspot.ru/2017\\_07\\_09\\_archive.html](http://desarrolloydefensa.blogspot.ru/2017_07_09_archive.html) (дата обращения: 05.10.2017).
- [7] Lozino-Lozinsky G., Timoshenko V. "Lessons learned from the BOR flight campaign" // Proceedings of the 3rd European Symposium on Aerothermodynamics for space vehicles. ESTEC, 1999. C. 9.
- [8] Гофин М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. М.: Мир, 2003. 637.
- [9] Glass D.E. Ceramic Matrix Composite (CMC) Thermal Protection Systems (TPS) and Hot Structures for Hypersonic Vehicles // Seminar. 2008. T. 2682. № May. C. 1–36.
- [10] Jenkins D.R., Landis T., Miller J. A MERICAN X-V EHCILES. An Inventory — X-1 to X-50 // Monographs in Aerospace History. 2003. № 31.
- [11] Palmer G., Polsky S. Aerothermal Analysis of the X-34 Vehicle // Access in Space. 1998. № January 2014. C. 84–86.
- [12] Hilfer G. Flight Qualification Testing of X-38 TPS Components Lessons Learned // Hot Structures and Thermal Protection Systems for Space Vehicles, Proceedings of the 4th European Workshop / под ред. A. Wilson. Palermo, Italy: European Space Agency. C. p.169.
- [13] Stewart DA, Leiser DB, DiFiore RR, Katvala VW. High efficiency tantalum-based ceramic composite structures [Internet]. Vol. 1. 2010. URL: <http://www.google.com/patents/US7767305%5Cnhttp://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US7767305.pdf> (дата обращения: 25.09.2017).
- [14] Ralf R., I-Wei C. Ceramics Science and Technology. Volume 1: Structures. Wiley-VCH, 2008. C. 565–566.
- [15] European Space Agency. Skylon Assessment Report. Noordwijk, Netherlands, 2011. № 1. 52 c.
- [16] Kuczera H, Sacher PW. Reusable Space Transportation Systems [Internet]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011. URL: <http://www.springer.com/us/book/9783540891802> (дата обращения: 01.10.2017).

- [17] Rufolo G., Roncioni P., Marini M. USV FTB-1 Reusable vehicle aerodatabase development. 2007.
- [18] NASA, SNC. Photo of Dream Chaser [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/2013-3230\\_0.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/2013-3230_0.jpg) (дата обращения: 05.10.2017).
- [19] Pezzella G. и др. Hypersonic Aerothermal Environment Preliminary Definition of the Cira Ftb-X Reentry Vehicle // Environment. 2007. № November. С. 1–25.
- [20] Viviani A., Pezzella G. Heat Transfer Analysis for a Winged Reentry Flight Test Bed // International Journal of Engineering. 2009. Т. 3. № 3. С. 329–345.
- [21] Ii F. и др. a Study of a High Lift Wing-Body Configuration for Low Earth Orbit Re-Entry. С. 140.
- [22] Tatsuki O., Mrityunjay S. Engineered Ceramics: Current Status and Future Prospects. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 232 с.
- [23] Грибков В.Н. [и др.] Возможности волокнистой тепловой защиты // Тр. Первой Междунар. авиац. конф. «Человек-Земля-Космос». М.: Российская инженерная академия. Секц. «Авиакосмическая», 1995. Т. 5. С. 223–231.
- [24] Шалин Р.Е., Зиновьев С.Н., Померанцева К.П., Моисеев Е.В., Шепелева Л.И. Термостойкий пластик КМУ-8 // Авиационная промышленность. 1987. № 5. С. 53–55.
- [25] Stewart D.A., Leiser D.B. Toughened Uni-piece, Fibrous, Reinforced, Oxidization-Resistant Composite: пат. 7314648 USA. USA, 2008. Т. 1. № 12.
- [26] Костылев В.М. Теплопроводность дисперсных тел при различной величине атмосферного давления // Теплофизика высоких температур. 1964. Т. 2. № 1. С. 21–28.
- [27] Суржиков С.Т., Шувалов М.П. Анализ радиационно-конвективного нагрева четырех типов спускаемых космических аппаратов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15. № 4. С. 1–18.
- [28] Бобылев А.В. [и др.]. Разработка аэродинамической компоновки и исследования аэротермодинамических характеристик малоразмерного крылатого возвращаемого аппарата // Ученые записки ЦАГИ. 2009. Т. XL, № 3. С. 3–15.
- [29] Денисов О. В., Минаков Д.С., Кирбай А.А. Методические особенности тепловых испытаний тонкостенных пластин из углепластика // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 7. С. 171–184. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/781946.html> (дата обращения: 13.08.2017).
- [30] Nguyen V. [и др.]. Dynamics and stability and control characteristics of the X-37 // American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2001. С. 1–10.

© Бодня И.С., Тимошенко В.П., 2017

### История статьи:

Дата поступления в редакцию: 14 октября 2017

Дата принятия к печати: 10 января 2018

### Для цитирования:

Бодня И.С., Тимошенко В.П. Численное моделирование тепловых режимов передней кромки крыла возвращаемого космического аппарата // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 7–21. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-7-21

### Сведения об авторах:

Бодня Иван Сергеевич — магистрант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). *Область научных интересов:* теплообмен, тепловые режимы космических аппаратов. *Контактная информация:* e-mail: ivanbodnya@gmail.com

*Тимошенко Валерий Павлович* — профессор кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). *Область научных интересов:* теплообмен, тепловая защита космических аппаратов, испытания космических аппаратов. *Контактная информация:* e-mail: moltim@yandex.ru

## NUMERICAL MODELING OF A WING LEADING-EDGE THERMAL REGIMES FOR A REUSABLE SPACE VEHICLE

I.S. Bodnya, V.P. Timoshenko

Bauman Moscow State Technical University (National research university of technology)  
5/1, 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russian Federation

Throughout the history of human exploration of outer space, work is underway to reduce the cost of bringing cargo into space. One of the technically feasible solutions to achieve this is the use of small-sized reusable aerospace vehicles. As the new thermal protection materials are developed, they are employed for the construction of the reusable aerospace vehicles (RSV). In this paper, the assessment is given of the possibility of making RSV wing leading edge from an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fiber based heat-resistant porous ceramic. The main advantages of using such material are its relatively low values of thermal conductivity and density, which makes it possible to improve weight characteristics of the RSV. The material of the support structure is heat-resistant carbon fiber reinforced polymer (CFRP). Due to the porous nature of such thermal protection system (TPS), it is necessary to consider the effect of air pressure on the thermal conductivity of the material. Therefore, a computational mathematical model is proposed that allows one to take into account this dependence of thermal conductivity on temperature and pressure for the wing edge porous TPS of an aerospace vehicle, during its re-entry in the atmosphere. Based on the temperature field inside the leading edge, the minimum thickness of the thermal protection coating was determined so that the support structure temperature stays within its maximum permissible operating range. It is shown that the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  heat-resistant porous ceramic can provide the required thermal protection, so that the maximum temperature of the composite support structure does not exceed 250 °C on the entire re-entry flight path.

**Key words:** mathematical modeling, wing leading edge, composite material, porous ceramics,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fibers, thermal protection, small-size aerospace vehicle, heat flow

### REFERENCES

- [1] Dumbacher D. NASA's Second Generation Reusable Launch Vehicle Program Introduction, Status and Future Plans. In: 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit [Internet]. Huntsville, Alabama: AIAA; 2002. Available from: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2002-3613>
- [2] Wang Z., Huang S., Shen L., Zhou H., Zhi J. Conceptual evaluation of multi-purpose aerospace plane. *Russian-American scientific journal: Actual problems of aviation and aerospace systems: processes, models, experiment*. Nanjing, China, 2014, 1(38), 45–57.
- [3] Johnson S.M. *Thermal Protection Materials: Development, Characterization and Evaluation*. Munich, Germany. 2012.
- [4] Daryabeigi K., Knutson J.R., Cunnington G.R. Heat Transfer Measurement and Modeling in Rigid High-Temperature Reusable Surface Insulation Tiles. AIAA. 2011; 345: 2011.

- [5] Nanowick L., Flow C. Lightweight Thermal Protection System for Atmospheric Entry. NASA Tech Briefs. 2007; (October 2007): 20—21.
- [6] Desarrollo y Defensa [Internet]. [cited 2017 Oct 13]. Available from: [http://desarrolloydefensa.blogspot.ru/2017\\_07\\_09\\_archive.html](http://desarrolloydefensa.blogspot.ru/2017_07_09_archive.html) (accessed: 05.10.2017).
- [7] Lozino-Lozinsky G., Timoshenko V. “Lessons learned from the BOR flight campaign”. In: Proceedings of the 3rd European Symposium on Aerothermodynamics for space vehicles. ESTEC; 1999. Pp. 9.
- [8] Gofin M. Thermal protection and hot structures of reusable space vehicles. Moscow: MIR publ. 2003. 637. (In Russ.).
- [9] Glass D.E. Ceramic Matrix Composite (CMC) Thermal Protection Systems (TPS) and Hot Structures for Hypersonic Vehicles. Seminar. 2008; 2682(May): 1—36.
- [10] Jenkins D.R., Landis T., Miller J. American X-Vehicles: An Inventory-X-1 to X-50. Monographs in Aerospace History. 2003. 65.
- [11] Palmer G., Polsky S. Aerothermal Analysis of the X-34 Vehicle. Access in Space. 1998;(January 2014): 84—86.
- [12] Hilfer G. Flight Qualification Testing of X-38 TPS Components Lessons Learned. In: A. Wilson, editor. Hot Structures and Thermal Protection Systems for Space Vehicles, Proceedings of the 4th European Workshop. Palermo, Italy: European Space Agency; p. p. 169.
- [13] Stewart D.A., Leiser D.B., DiFiore R.R., Katvala V.W. High efficiency tantalum-based ceramic composite structures [Internet]. Vol. 1. 2010. Available from: <http://www.google.com/patents/US7767305%5Cnhttp://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US7767305.pdf> (accessed: 25.09.2017).
- [14] Ralf R., I-Wei C. Ceramics Science and Technology. Volume 1: Structures. In Wiley-VCH; 2008. p. 565—566.
- [15] European Space Agency. Skylon Assessment Report. Noordwijk, Netherlands; 2011.
- [16] Kuczera H., Sacher P.W. Reusable Space Transportation Systems [Internet]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg; 2011. Available from: <http://www.springer.com/us/book/9783540891802> (accessed: 01 Oct 2017).
- [17] Rufolo G., Roncioni P., Marini M. USV FTB-1 Reusable vehicle aerodatabase development. 2007.
- [18] NASA, SNC. Photo of Dream Chaser [Internet]. Available from: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/2013-3230\\_0.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/2013-3230_0.jpg) (accessed: 05 Oct 2017).
- [19] Pezzella G., Battista F., Schettino A., Marini M., Matteis P.De. Hypersonic Aerothermal Environment Preliminary Definition of the Cira Ftb-X Reentry Vehicle. Environment. 2007; (November): 1—25.
- [20] Viviani A., Pezzella G. Heat Transfer Analysis for a Winged Reentry Flight Test Bed. International Journal of Engineering. 2009; 3(3): 329—345.
- [21] Li F., Ingegneria F.DI, Di D., In R., Aerospaziale I. a Study of a High Lift Wing-Body Configuration for Low Earth Orbit Re-Entry. 140.
- [22] Tatsuki O., Mrityunjay S. Engineered Ceramics: Current Status and Future Prospects. New Jersey: John Wiley & Sons; 2015. 232 p.
- [23] Gribkov B.N., Mizurina G.T., Shetanov B.V., Lyapin V.V. Possibilities of fibrous thermal protection. In: Proceedings of the First International Aviation Conference ‘Man-Earth-Space’. Moscow: Russian Engineering Academy. Sec. ‘Aerospace’; 1995. p. 223—231.
- [24] Shalin R.E., Zinoviev S.N., Pomerantsev K.P., Moiseev E.B., Shepeleva L.I. Thermostable carbon plastic KMU-8. *Aviation industry*, 1987, (5), 53—55. (In Russ.).
- [25] Stewart D.A., Leiser D.B. Toughened Uni-piece, Fibrous, Reinforced, Oxidization-Resistant Composite. Vol. 1. USA; 7314648, 2008.
- [26] Kostylev V.M. Thermal conductivity of dispersed bodies at different atmospheric pressure. *Thermal physics of high temperatures*. 1964. 2(1), 1—18. (In Russ.).
- [27] Surzhikov S.T., Shuvalov M.P. Analysis of radiation-convective heating of four types of descent space vehicles. *Physico-chemical kinetics in gas dynamics*. 2014. 15(4). 1—18 (in Russ.).

- [28] Bobylev A.V., Vaganov A.V., Dmitriev V.G., Zadonsky S.M., Kireev A.Y., Skuratov A.S., et al. Development of aerodynamic configuration and research of aerothermodynamic characteristics of a small-sized winged space vehicle. *Scientific notes TsAGI*. 2009, XL(3), 3–15. (In Russ.).
- [29] Denisov O., Minakov D., Kirbay A. Methodical Specifics of Thermal Experiments with Thin Carbon Reinforced Plates. *Science and Education of the Bauman MSTU [Internet]*. 2015. (7). 171–184. Available from: <http://technomag.bmstu.ru/doc/781946.html> (accessed: 13.08.2017).
- [30] Nguyen V., Poladian D., Falangas E., Chaudhary A., Tran H. Dynamics and stability and control characteristics of the X-37. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2001; 1–10.

**Article history:**

Received: October 14, 2017

Accepted: January 10, 2018

**For citation:**

Bodnya I.S., Timoshenko V.P. (2018). Numerical modeling of a wing leading-edge thermal regimes for a reusable space vehicle. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19 (1). 7–21. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-7-21

**Bio Note:**

*Ivan S. Bodnya* — master student at Bauman Moscow State Technical University in the Mechanical engineering department SM-13 “Space-Rocket Composite Designs”. *Research interests*: heat transfer, thermal regimes of space vehicles. *Contact information*: e-mail: [ivanbodnya@gmail.com](mailto:ivanbodnya@gmail.com)

*Valery P. Timoshenko* — professor at Bauman Moscow State Technical University in the Mechanical engineering department SM-13 “Space-Rocket Composite Designs”. *Research interests*: heat transfer, thermal protection of space vehicles, space vehicles tests. *Contact information*: e-mail: [moltim@yandex.ru](mailto:moltim@yandex.ru)



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-22-37

УДК 004.94, 533.6

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ МЕЖДУ ОТДЕЛЯЕМОЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКОЙ И САМОЛЕТОМ-НОСИТЕЛЕМ

Л.В. Быков<sup>1</sup>, О.А. Пашков<sup>1</sup>, М.Н. Правидло<sup>2</sup>, Д.С. Яньшев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)  
Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4

<sup>2</sup> Открытое акционерное общество «Государственное машиностроительное конструкторское бюро «Вымпел» им. И.И. Торопова»  
Российская Федерация, 125424, Москва, Волоколамское шоссе, 90

Целями данной работы были разработка достоверной методики численного моделирования интерференции между самолетом-носителем и отделяемой полезной нагрузкой, исследование влияния интерференции на аэродинамические характеристики отделяемой нагрузки. Предложен алгоритм решения задачи влияния интерференции на поведение отделяемого объекта. Описана математическая модель обтекания твердого тела сверхзвуковым потоком. В качестве модели турбулентности течения использована модель турбулентности Ментера SST. Рассмотрены схема работы связанного решателя, методы дискретизации уравнений по времени в сочетании с линеаризацией потоков по методу Ньютона. Описаны особенности задания граничных условий и обезразмеривания аэродинамических характеристик исследуемого объекта. Исследования обтекания изолированного объекта проводились на неструктурированной расчетной сетке. Получены суммарные аэродинамические характеристики отделяемого объекта, как изолированного тела, так и в присутствии самолета-носителя. Проведено сравнение полученных аэродинамических характеристик изолированного изделия с аэродинамическими характеристиками, действующими на изделие, в присутствии носителя. Разработанная методика верифицирована по данным продувок. Представлены данные о влиянии носителя на аэродинамические характеристики отделяемой нагрузки. Сделан вывод о возможности использования предложенной методики при исследовании взаимного влияния движущихся в воздушной среде объектов.

**Ключевые слова:** самолет, полезная нагрузка, аэродинамические характеристики, интерференция, уравнения Навье-Стокса, турбулентность, численное моделирование

### Введение

Возросшие скорости самых различных движущихся механических объектов обусловили повышенное внимание к их аэродинамическим характеристикам. В последнее время определение аэродинамических характеристик расчетным путем получило широкое распространение, как в области разработки летательных аппаратов, так и в проектировании автомобилей, тягового парка железнодорожного транспорта и других областях машиностроения. В то же время в печати практически отсутствуют работы, посвященные взаимовлиянию движущихся вблизи друг друга объектов.

Известно, что на обеспечение безопасности отделения полезной нагрузки от самолета-носителя существенное влияние оказывает интерференция, возникающая между ними в начальные моменты времени. При этом происходит изменение аэродинамических характеристик отделяемого объекта по отношению к его же характеристикам, характерным для него как для изолированного тела. Знание аэродинамических характеристик изолированных тел и их изменения в результате интерференции позволяет оценить характер движения отделяемого объекта вблизи носителя, синтезировать оптимальный алгоритм управления, как процессом отделения, так и стабилизации отделяемого объекта на начальном этапе его самостоятельного движения.

Применение современных информационных технологий инженерного анализа позволяет обеспечить эффективное и адекватное решение задач моделирования аэродинамических процессов. Однако задача моделирования аэродинамической интерференции современными информационными технологиями практически не решается.

В настоящей работе предложен алгоритм решения подобной задачи. Получены суммарные аэродинамические характеристики отделяемого объекта в присутствии самолета-носителя и проведено сравнение полученных характеристик с аэродинамическими характеристиками изолированного изделия.

В рамках данной работы исследовалось обтекание изолированного объекта, а также компоновки, представляющей собой самолет-носитель с отделяемым объектом. В случае обтекания компоновки рассматривалось два положения изделия:

1) отделяемый объект находится в транспортном положении и имеет координату  $Y_{\text{отн}} = 0,0$  м;

2) отделяемый объект располагается на 0,6 м ниже транспортного положения (т.е. в положении отхода от транспортного положения) и имеет координату  $Y_{\text{отн}} = 0,6$  м.

### Математическая модель обтекания твердого тела сверхзвуковым потоком

**Параметры рабочего тела.** В рамках данной работы воздух рассматривался как идеальный вязкий газ. В таком случае расчетные параметры представляются в виде:

— плотность

$$\rho_{\text{см}} = \frac{P_{\text{ст}}}{R_{\text{ц}} T}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ст}}$  — местное статическое давление, Па;  $R_{\text{ц}}$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — местная температура, К;

— удельная изобарная теплоемкость и удельная теплопроводность задавалась по кусочно-линейному закону в виде функции от температуры;

— динамическая вязкость задавалась по известной формуле Сатерленда:

$$\mu_i = \mu_{\text{норм}} \left( \frac{T}{T_{\text{норм}}} \right)^{3/2} \frac{T_{\text{норм}} + S}{T + S}, \quad (2)$$

где  $\mu_{\text{норм}}$  — динамическая вязкость при нормальных условиях, Па·с;  $T$  — статическая температура, К;  $T_{\text{норм}}$  — температура при нормальных условиях, К;  $S$  — эффективная температура (константа Сатерленда), К.

Дискретизация уравнений по методу контрольного объема. Для решения уравнений механики сплошной среды в работе применен метод контрольного объема. Сущность метода контрольного объема выражается в интегрировании уравнения переноса в каждом выделенном объеме. В итоге, получается дискретное уравнение, представляющее закон сохранения в данном объеме.

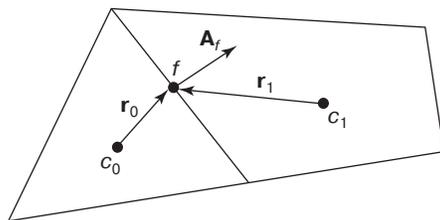
Дискретизация основных уравнений механики сплошной среды иллюстрируется на примере преобразования нестационарного уравнения переноса некой скалярной величины  $\varphi$ .

Так, для произвольного контрольного объема  $V$  будет справедливо следующее уравнение в интегральной форме:

$$\int_V \frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} dV + \oint \rho \varphi \mathbf{u} \cdot d\mathbf{A} = \oint \Gamma_\varphi \nabla \varphi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\varphi dV, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{u}$  — вектор скорости;  $\mathbf{A}$  — вектор площади поверхности, ограничивающей контрольный объем;  $\Gamma_\varphi$  — коэффициент диффузии для  $\varphi$ ;  $\nabla \varphi$  — градиент величины  $\varphi$ ;  $S_\varphi$  — источник  $\varphi$  на единицу объема.

Уравнение (3) применяется к каждому контрольному объему или ячейке расчетной области. Схема двухмерной, треугольной ячейки, приведена на рисунке 1 и служит примером такого контрольного объема.



**Рис. 1.** Пример контрольного объема  
 [Fig. 1. Example of control volume]

С применением метода дискретизации, уравнение (3) для данной ячейки принимает вид:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \mathbf{u}_f \varphi_f \cdot \mathbf{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\varphi \nabla \varphi_f \cdot \mathbf{A}_f + S_\varphi V, \quad (4)$$

где  $N_{\text{faces}}$  — число граней, охватывающих ячейку;  $\varphi_f$  — значение величины  $\varphi$ , проходящей через грань  $f$ ;  $\rho_f \mathbf{u}_f$  — поток массы через грань  $f$ ;  $\mathbf{A}_f$  — ориентированная грань

$f$  — контрольный объем;  $\nabla\varphi_f$  — градиент величины  $\varphi$ , вычисленный в центре грани  $f$ ;  $V$  — контрольный объем.

В дискретном виде уравнение переноса (4) содержит неизвестную скалярную переменную  $\varphi$  в центре ячейки, а также неизвестные ее значения в окружающих соседних ячейках. Это уравнение является, в общем случае, нелинейным относительно этих переменных. Линеаризации такого уравнения имеет вид:

$$a_p\varphi = \sum_{nb} a_{nb}\varphi_{nb} + b, \quad (5)$$

где нижний индекс  $nb$  относится к соседним ячейкам;  $a_p$  и  $a_{nb}$  — линеаризованные коэффициенты для переменных  $\varphi$  и  $\varphi_{nb}$ .

При проведении расчета дискретные значения величины  $\varphi$  определяются в центрах расчетных ячеек (точки  $c_0$  и  $c_1$  на рис. 1). Однако для вычисления конвективных членов в уравнении (4) необходимо знать значения величины  $\varphi$  на гранях ячейки  $\varphi_f$ . Для этого необходимо интерполировать их из значений в центре ячейки. В данном случае интерполяция выполнялась по схеме второго порядка против потока. Термин «против потока» означает, что значение величины  $\varphi$  на элементарной поверхности  $f$  получается из величины в ячейке вверх по потоку или «против потока» относительно направления скорости по нормали  $v_n$  в уравнении.

Известно, что для численного моделирования областей с большими градиентами физических величин целесообразно применять схемы дифференцирования второго порядка точности. В этом случае значения скалярной величины на гранях ячейки вычисляются с использованием подхода многомерного линейного восстановления [1]. При таком подходе точность более высокого порядка на гранях ячейки достигается путем разложения в ряд Тейлора величины  $\varphi$  в окрестности центра ячейки.

Таким образом, при использовании схемы против потока второго порядка, значение скалярной величины на гранях ячейки  $\varphi_f$  приводятся к виду:

$$\varphi_{f,SOU} = \varphi + \nabla\varphi \cdot \mathbf{r}, \quad (6)$$

где  $\varphi$  — значение величины в центре ячейки;  $\nabla\varphi$  — градиент  $\varphi$  в ячейке вверх по потоку;  $\mathbf{r}$  — вектор от центра ячейки, расположенной вверх по потоку, к центру грани ячейки.

Для определения градиента скалярной величины  $\varphi$  в центре ячейки  $c_0$  с использованием теоремы Грина—Гаусса может быть записана следующая дискретная форма:

$$(\nabla\varphi)_{c_0} = \frac{1}{V} \sum_f \bar{\varphi}_f \mathbf{A}_f, \quad (7)$$

где  $\bar{\varphi}_f$  — значение величины  $\varphi$  в центре грани ячейки;  $V$  — контрольный объем.

Суммирование осуществляется по всем граням  $f$ , образующим ячейку.

Значение  $\varphi_f$  определялось путем арифметического осреднения значений величины  $\varphi$  в центрах соседних ячеек:

$$\bar{\varphi}_f = \frac{\varphi_{c_0} + \varphi_{c_1}}{2}. \quad (8)$$

Наконец, градиент  $\nabla\varphi$  ограничивался с помощью стандартного ограничителя [2], в целях подавления осцилляций вблизи скачков уплотнения, ударных волн и вблизи областей с большими градиентами физических величин.

Члены диффузии в уравнении (4) представлены как центрально-разностные. Центрально-разностная схема второго порядка точности для вычисления значений  $\varphi_f$  на поверхности элементарной ячейки базируется на применении следующего соотношения:

$$\bar{\varphi}_{f,CD} = \frac{1}{2}(\varphi_0 + \varphi_1) + \frac{1}{2}(\nabla\varphi_0 \cdot \mathbf{r}_0 + \nabla\varphi_1 \cdot \mathbf{r}_1), \quad (9)$$

где индексами 0 и 1 отмечены значения параметров в двух соседних ячейках, имеющих общую грань  $f$ ;  $\nabla\varphi_0$  и  $\nabla\varphi_1$  — градиенты, вычисленные в ячейках 0 и 1 соответственно;  $\mathbf{r}$  — вектор, направленный из центра ячейки к центру грани ячейки (индексы 0 и 1 обозначают ячейки 0 и 1 соответственно).

Известно, что центрально-разностная схема в отдельных случаях может приводить к бесконечно большому значению вычисляемой величины  $\varphi$  и нефизичным колебаниям. Эти особенности могут стать причиной неустойчивости численного метода. Однако указанный недостаток устраняется путем использования метода отложенной коррекции. При использовании этого метода значение скалярной переменной на элементарной поверхности ячейки вычисляется следующим образом:

$$\varphi_f = \varphi_{f,UP} + (\varphi_{f,CD} - \varphi_{f,UP}), \quad (10)$$

где индексом  $UP$  отмечено значение  $\varphi_f$  вверх по потоку. Слагаемое  $\varphi_{f,UP}$  вычисляется неявно, а разность  $(\varphi_{f,CD} - \varphi_{f,UP})$  — явно.

Для дискретизации нестационарного члена в уравнении (4) использовался неявный метод первого порядка точности.

В общем случае выражение для изменяющейся во времени переменной  $\varphi$  может быть представлено в виде:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = F(\varphi), \quad (11)$$

где функция  $F$  включает в себя любую пространственную дискретизацию.

При использовании неявного метода дискретизации первого порядка точности по времени функция  $F(\varphi)$  на следующем шаге по времени определяется следующим соотношением:

$$\frac{\varphi^{n+1} - \varphi^n}{\Delta t} = F(\varphi^{n+1}). \quad (12)$$

В свою очередь  $\varphi^{n+1}$  представляется уравнением

$$\varphi^{n+1} = \varphi^n + \Delta t F(\varphi^{n+1}). \quad (13)$$

Оно может быть решено итерационно на каждом шаге по времени перед переходом на следующий шаг.

Преимущество полностью неявной схемы состоит в том, что она является, безусловно, устойчивой относительно размера шага по времени.

**Особенности моделирования турбулентности.** В рамках данной работы рассматривались потоки с высокими числами Рейнольдса. Для замыкания системы уравнений Навье—Стокса применялась модель турбулентности Менгера SST [3], которая является одной из многих моделей, использующих принцип осреднения по Рейнольдсу.

**Схема работы связанного решателя.** Для решения набора уравнений неразрывности, количества движения, энергии и переноса компонентов применялся связанный решатель.

При определении осредненных свойств потока газа в контрольном объеме  $V$ , ограниченном замкнутой поверхностью  $A$ , система уравнений механики сплошной среды записывалась в интегральной форме в виде [4]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{W} dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V \mathbf{H} dV, \quad (14)$$

где вектор  $\mathbf{H}$  содержит источниковые члены. Векторы  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{G}$  определялись следующим образом:

$$\mathbf{W} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho v u + p \hat{i} \\ \rho v v + p \hat{j} \\ \rho v w + p \hat{k} \\ \rho v E + p v \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}, \quad (15)$$

где  $\rho$ ,  $E$  и  $p$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>, полная энергия на единицу массы, Дж/м<sup>3</sup> и давление газа в контрольном объеме, Па;  $\tau$  — тензор вязких напряжений;  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  — компоненты вектора скорости газа в декартовой системе координат.

Полная энергия на единицу массы газа  $E$  связана с энтальпией торможения  $H_0$  следующим соотношением:

$$E = H_0 - p/\rho; \quad (16)$$

$$H_0 = h + |\mathbf{u}|^2/2. \quad (17)$$

где  $h$  — термодинамическая статическая энтальпия газа, кДж/моль;  $|\mathbf{u}|$  — модуль скорости газа.

Запись уравнений Навье—Стокса в форме (14) обеспечивает хорошую сходимость расчета в областях сверхзвукового течения. Однако при моделировании областей низкоскоростного течения возникают трудности в расчете по причине возникающей численной жесткости уравнений, которая обусловлена сложностью правильного определения скорости звука в слабо сжимаемых и несжимаемых потоках [5]. Для устранения указанного недостатка уравнение (14) подвергалось преобразованию, которое получается преобразованием зависимой переменной в уравнении (14)  $\mathbf{W}$  в переменную  $\mathbf{Q}$  с использованием дифференцирования сложной функции. Эта операция проводится по схеме:

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{Q}} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{Q} dV + \oint [\mathbf{F} - \mathbf{G}] \cdot d\mathbf{A} = \int_V \mathbf{H} dV, \quad (18)$$

где  $\mathbf{Q}$  — вектор  $\{p, u, v, w, T\}^T$ ;

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial \mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \rho_p & 0 & 0 & 0 & \rho_T \\ \rho_p u & \rho & 0 & 0 & \rho_T u \\ \rho_p v & 0 & \rho & 0 & \rho_T v \\ \rho_p w & 0 & 0 & \rho & \rho_T w \\ \rho_p H_0 - \delta & \rho u & \rho v & \rho w & \rho_T H_0 + \rho C_p \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Здесь

$$\rho_p = \left. \frac{\partial \rho}{\partial p} \right|_T, \quad \rho_T = \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_p. \quad (20)$$

Выбор простых переменных  $\mathbf{Q}$  в качестве зависимых переменных потому вполне обоснован, что при использовании второго порядка точности дискретизации по пространству вектор  $\mathbf{Q}$  должен быть восстановлен быстрее, чем вектор  $\mathbf{W}$ , для обеспечения получения более точных градиентов скорости и температуры в вязких потоках.

Осуществим переобусловливание выражения (19) путем замены матрицы определителя  $\partial \mathbf{W} / \partial \mathbf{Q}$  на матрицу  $\Gamma$ .

В результате система в консервативной форме примет следующий вид:

$$\Gamma \frac{\partial}{\partial t} \int_V \mathbf{Q} dV + \oint [\mathbf{F} - \mathbf{G}] \cdot d\mathbf{A} = \int_V \mathbf{H} dV, \quad (21)$$

где

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Theta & 0 & 0 & 0 & \rho_T \\ \Theta u & \rho & 0 & 0 & \rho_T u \\ \Theta v & 0 & \rho & 0 & \rho_T v \\ \Theta w & 0 & 0 & \rho & \rho_T w \\ \Theta H_0 - \delta & \rho u & \rho v & \rho w & \rho_T H_0 + \rho C_p \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Здесь

$$\Theta = \left( \frac{1}{U_r^2} - \frac{\rho_T}{\rho C_p} \right). \quad (23)$$

Относительная скорость  $U_r$  в уравнении (24), выбирается локально так, чтобы собственные значения системы оставались хорошо обусловленными относительно конвективных и диффузионных временных масштабов [6].

Резльтирующие собственные значения предварительно обработанной системы (21) равны:

$$u, u, u, u' + c', u' - c', \quad (24)$$

где  $u = v \cdot \hat{n}$ ;  $u' = u(1 - \alpha)$ ;  $c' = \sqrt{a^2 u^2 + U_r^2}$ ,  $\alpha = (1 - \beta U_r^2)/2$ ,  $\beta = \left( \rho_p + \frac{\rho_T}{\rho C_p} \right)$ .

Следует учесть, что если плотность среды задается по закону идеального газа, то  $\beta = (k \cdot R \cdot T)^{-1} = 1/c^2$ . Таким образом, когда  $U_r = c$  (при звуковых и сверхзвуковых скоростях),  $\alpha = 0$ , а собственные значения преобразованной системы принимают свою традиционную форму:  $u \pm c$ .

Однако в случае низкоскоростного течения, когда  $U_r \rightarrow 0$ , а  $\alpha \rightarrow 1/2$ , все собственные значения становятся того же порядка величины, что и  $u$ . Эти условия выполняются до тех пор, пока относительная скорость и местная скорость будут величинами одного порядка.

Таким образом, собственные значения преобразованной системы остаются хорошо обусловленными при всех скоростях.

Вектор невязкого потока  $\mathbf{F}$ , в уравнении (21), вычисляется с помощью стандартной противопоточной схемы в сочетании с методом расщепления потока Ройе [7; 8]. При использовании такого подхода предполагается, что вектор потока  $\mathbf{F}$  содержит характерную информацию, которая распространяется через расчетную область со скоростью и направлением согласно собственным значениям системы.

Разделив вектор  $\mathbf{F}$  на несколько частей, где каждая часть содержит информацию, перемещающуюся в характерном направлении и, применив к каждой части дифференцирование вверх по потоку в соответствии с их собственными значениями, получим следующее выражение для дискретного потока на каждой элементарной поверхности:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2}(\mathbf{F}_R + \mathbf{F}_L) - \frac{1}{2} \Gamma |\hat{A}| \delta \mathbf{Q}, \quad (25)$$

где  $\delta \mathbf{Q}$  — пространственная разница  $\mathbf{Q}_R - \mathbf{Q}_L$ .

Потоки  $\mathbf{F}_R = F(\mathbf{Q}_R)$  и  $\mathbf{F}_L = F(\mathbf{Q}_L)$  вычисляются с использованием восстановленных векторов решения  $\mathbf{Q}_R$  и  $\mathbf{Q}_L$  с «правой» и «левой» стороны от грани ячейки. Матрица  $|\hat{A}|$  задается следующим образом:

$$|\hat{A}| = M |\Lambda| M^{-1}, \quad (26)$$

где  $\Lambda$  — диагональная матрица собственных значений;  $M$  — матрица перехода от симметризованных к консервативным переменным, которая диагонализует матрицу  $\Gamma^{-1}A$ . Здесь  $A$  — якобиан невязкого потока  $\partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{Q}$ .

Уравнение (25) можно рассматривать как центрально-разностную схему второго порядка, плюс дополнительное матричное разложение. Член дополнительного матричного разложения описывает распространение в процессе установления численных возмущений всех переменных вверх по потоку в случае сверхзвукового течения. Кроме того, он обеспечивает связь поля скорости и поля давления, что необходимо для получения устойчивого решения в областях низкоскоростного течения.

Дискретизация по времени в рассматриваемом решателе осуществляется так называемым методом установления.

В рамках данной работы дискретизация по времени уравнений (21) осуществлялась с помощью неявной схемы Эйлера в сочетании с линеаризацией потоков по методу Ньютона. В результате была получена следующая линеаризованная система в так называемой дельта-форме [9]:

$$\left[ D + \sum_j^{N_{faces}} S_{j,k} \right] \Delta \mathbf{Q}^{n+1} = -\mathbf{R}^n, \quad (27)$$

где  $\mathbf{R}^n$  — вектор невязок.

Центральные и недиагональные матрицы коэффициентов  $D$  и  $S_{j,k}$  определяются следующим образом:

$$D = \frac{V}{\Delta t} \Gamma + \sum_j^{N_{faces}} S_{j,i}; \quad (28)$$

$$S_{j,k} = \left( \frac{\partial \mathbf{F}_j}{\partial \mathbf{Q}_k} - \frac{\partial \mathbf{G}_j}{\partial \mathbf{Q}_k} \right) A_j. \quad (29)$$

В выражении (28) значение шага по времени  $\Delta t$  вычисляется из значения критерия Куранта—Фридрихса—Леви (CFL) следующим образом:

$$\Delta t = \frac{2 CFL V}{\sum_f \lambda_f^{\max} A_f}, \quad (30)$$

где  $V$  — объем ячейки;  $A_f$  — площадь грани ячейки;  $\lambda_f^{\max}$  — максимум локальных собственных значений, заданных уравнением (26).

Уравнения (27) решались мультисеточным методом, описанным в работе [10].

**Особенности задания граничных условий.** В рамках данной работы расчетная область определялась следующими граничными условиями: сверхзвуковой вход, выход потока, твердая стенка.

На входе в расчетную область использовалось граничное условие входа сверхзвукового потока. Поскольку в этом случае скорость набегающего потока больше скорости звука все собственные значения матрицы, определяющей конвективный перенос через границу, имеют положительный знак, т.е. возмущения распространяются от границы внутрь расчетной области. В этом случае на границе необходимо задавать все параметры течения в явной форме. В работе задавались три компоненты скорости, статическая температура и статическое давление набегающего потока.

На выходной границе расчетной области использовалось граничное условие выхода потока в область с фиксированным давлением. В том случае, если выходящий через границу поток является сверхзвуковым, все возмущения распространяются наружу из расчетной области. Значения параметров потока на границе получались путем экстраполяции из ячеек, расположенных перед выходной границей (т.е. вверх по потоку).

Таким образом, только четыре из пяти характеристик потока ( $p, u, v, w, T$ ) считались направленными из расчетной области. Одна характеристика направлялась внутрь расчетной области. Четыре параметра течения экстраполировались из ячеек, расположенных перед выходной границей, а пятый параметр (статическое давление  $p$ ) задавался на границе явно. Принималось, что на выходной границе статическое давление равно статическому давлению набегающего потока.

Для границы расчетной области, совпадающей с поверхностью исследуемого тела, задавались следующие граничные условия:

— для уравнений количества движения — условие прилипания. Это означает, что на поверхности обтекаемого тела нормальная и касательная составляющие вектора скорости потока равны нулю, т.е.  $u_x = 0, u_y = 0, u_z = 0$ ;

— для уравнения энергии принималось условие адиабатичности твердой поверхности.

**Особенности задания начального приближения.** Поскольку при моделировании внешнего обтекания твердого тела можно выделить преимущественное направление потока в большей части расчетной области, то в качестве начального приближения было решено в начале итерационного процесса в каждой ячейке расчетной области задавать такие же значения всех параметров потока, как и на входной границе.

**Обезразмеривание аэродинамических характеристик.** В рамках данной работы суммарные аэродинамические силы обезразмеривались (на примере коэффициента продольной силы) следующим образом:

$$c_x = \frac{R_x}{\frac{\rho v_\infty^2}{2} S},$$

где  $S$  — площадь миделя,  $m^2$ ,  $S = 0,0531 m^2$ ;  $\rho$  — статическая плотность невозмущенного потока, Па;  $v_\infty$  — скорость набегающего потока, м/с;  $R_x$  — проекция полной аэродинамической силы на ось  $OX$  системы координат связанной с изделием, Н.

Суммарные аэродинамические моменты обезразмеривались следующим образом (на примере коэффициента  $m_z$ ):

$$m_z = \frac{M_z}{\frac{\rho v_\infty^2}{2} SL},$$

где  $S$  — площадь миделя,  $m^2$ ,  $S = 0,0531 m^2$ ;  $L$  — характерный линейный размер изделия (длина изделия), м,  $L = 4,490 m$ ;  $\rho$  — статическая плотность невозмущенного потока, Па;  $v_\infty$  — скорость набегающего потока, м/с;  $M_z$  — составляющая полного аэродинамического момента по оси  $OZ$  системы координат, связанной с изделием, Н·м.

### Результаты численных исследований

В рамках данной работы были проведены исследования обтекания изолированного объекта при параметрах набегающего потока (табл. 1), а также компоновки представляющей собой самолет-носитель с отделяемым объектом при параметрах набегающего потока (табл. 2).

Таблица 1

Параметры потока, набегающего на изолированный объект  
[Parameters of flow over isolated object]

$M_\infty$	$P_{\infty}$ , Па	$T_{\infty}$ , К	$\rho_{\infty}$ , кг/м <sup>3</sup>	$V_{\infty}$ , м/с
1,7	101 325	288	1,225	578,3

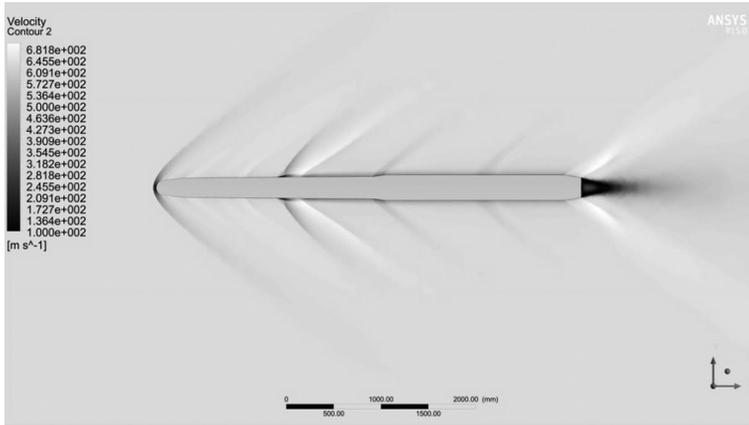
Таблица 2

Параметры потока, набегающего на компоновку  
[Parameters of flow over payload and parent aircraft]

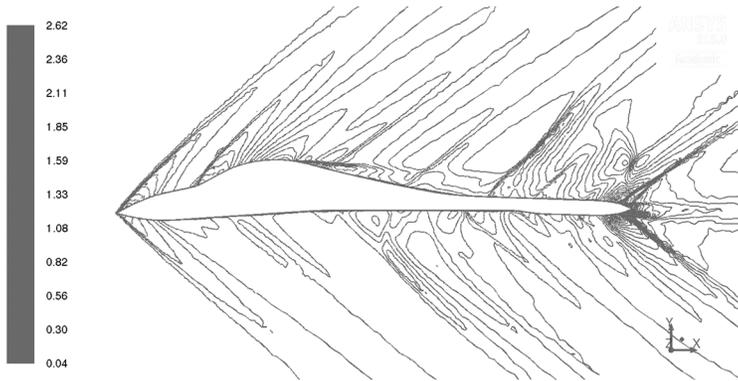
$M_\infty$	$P_{\infty}$ , Па	$T_{\infty}$ , К	$\rho_{\infty}$ , кг/м <sup>3</sup>	$Y_{\text{отн}}$ , м	$V_{\infty}$ , м/с
1,7	101 325	288	1,225	0,0	578,3
1,7	101 325	288	1,225	0,6	578,3

Исследования обтекания изолированного объекта проводились на неструктурированной сетке размерностью 9 млн тетраэдральных ячеек.

Для проведения исследований обтекания самолета-носителя с отделяемым объектом была построена неструктурированная расчетная сетка размерностью 24 млн тетраэдральных ячеек. Для достоверного моделирования пограничного слоя был построен призмослой толщиной в 6 ячеек.



**Рис. 2.** Структура скачков уплотнения в окрестностях изолированного объекта  
**[Fig. 2. Shock structure near isolated object]**



**Рис. 3.** Поле чисел Маха вблизи самолета-носителя в плоскости OXY ( $M_\infty = 1,7$ )  
**[Fig. 3. Mach field near parent aircraft in OXY plane ( $M_\infty = 1,7$ )]**

Полученные результаты (рис. 2, 3) позволили провести сравнение аэродинамических характеристик изолированного объекта и объекта в присутствии самолета-носителя, т.е. оценить аэродинамическую интерференцию между изделием и носителем.

В таблице 3 представлены коэффициенты аэродинамических сил и моментов, действующих на изделие, в присутствии носителя в двух положениях:  $Y_{отн} = 0,0$  м и  $Y_{отн} = 0,6$  м, а также коэффициенты аэродинамических сил и моментов изолированного изделия.

Таблица 3

**Аэродинамические характеристики отделяемого объекта**  
**[Aerodynamic characteristics of the ejectable payload]**

Параметры расчета	Коэффициенты					
	$C_x$	$C_y$	$C_z$	$m_x$	$m_y$	$m_z$
$Y_{отн} = 0,0$ м	0,9440	0,2883	0,7114	0,0013	0,2618	-0,7141
$Y_{отн} = 0,6$ м	0,9803	0,2960	0,1858	0,0006	0,0979	-0,1887
Изолированное изделие	1,8748	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

### Выводы

Анализ полученных результатов показал, что в отличие от изолированного изделия, коэффициенты нормальной и боковой силы изделия в присутствии носителя не равны нулю. Видно также, что в присутствии носителя у изделия не равны нулю коэффициенты момента тангажа и рыскания. Эти эффекты связаны с затенением хвостового оперения изделия конструктивными элементами носителя, а также интерференцией между ними. Из таблицы 3 видно:

— коэффициенты боковой силы, момента тангажа и рыскания резко убывают при отдалении изделия от носителя. При удалении изделия от носителя интерференция резко ослабевает, что и приводит к уменьшению боковой силы, а также моментов тангажа и рыскания. В положении  $Y_{\text{отн}} = 0,6$  м, т.е. на удалении от носителя, хвостовое оперение изделия обтекает практически симметрично, что вполне ожидаемо при нулевом угле атаки;

— коэффициенты нормальной и продольной силы при удалении изделия от носителя ведут себя по-разному. Этот эффект, вероятно, связан с некоторой скошенностью потока в горизонтальной плоскости, которая индуцируется стреловидной консолью крыла.

Следует отметить, что при удалении изделия от носителя наблюдается некоторое увеличение коэффициента продольной силы. Причем коэффициенты продольной силы изделия при  $Y_{\text{отн}} = 0,0$  м и  $Y_{\text{отн}} = 0,6$  м значительно меньше коэффициента продольной силы изолированного изделия. Это, вероятно, также связано с затенением хвостовой части изделия. Так, коэффициент продольной силы изделия при  $Y_{\text{отн}} = 0,0$  м составляет лишь 50% от его значений для изолированного изделия, а при  $Y_{\text{отн}} = 0,6$  м — 52%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] McBride B.J., Gordon S., Reno M.A. Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species // National Aeronautics and Space Administration. Office of Management Scientific and Technical Information Program. 1993.
- [2] Barth T.J., Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes // Technical Report AIAA-89-0366. AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada. 1989.
- [3] Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. August 1994. № 32(8). Pp. 1598–1605.
- [4] *Быков Л.В., Молчанов А.М., Щербачев М.А., Янышев Д.С.* Вычислительная механика сплошных сред в задачах авиационной и космической техники: учеб. пособие. М.: ООО «Ленанд», 2015, 668 с.
- [5] Venkateswaran S., Weiss J. M., Merkle C.L. Propulsion Related Flowfields Using the Preconditioned Navier–Stokes Equations // Technical Report AIAA-92-3437. AIAA/ASME/SAE/ASEE 28th Joint Propulsion Conference, Nashville, TN. July 1992.
- [6] Weiss J.M., Smith W. A. Preconditioning Applied to Variable and Constant Density Flows // AIAA Journal. November 1995. № 33(11). Pp. 2050–2057.
- [7] Roe P.L. Characteristic based schemes for the Euler equations // Annual Review of Fluid Mechanics. 18. 337–365. 1986.
- [8] Roe P.L. A survey of upwind differencing techniques // Lecture Notes in Physics, 1989, 323, 69.

- [9] Weiss J.M., Maruszewski J.P., Smith W.A. Implicit Solution of the Navier-Stokes Equations on Unstructured Meshes // Technical Report AIAA-97-2103. 13th AIAA CFD Conference, Snowmass, CO July. 1997.
- [10] Hutchinson B.R., Raithby G.D. A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy // Numerical Heat Transfer. 9. 1986. 511–537.

© Быков Л.В., Пашков О.А., Правидло М.Н., Янышев Д.С., 2017

#### **История статьи:**

Дата поступления в редакцию: 18 октября 2017

Дата принятия к печати: 10 января 2018

#### **Для цитирования:**

*Быков Л.В., Пашков О.А., Правидло М.Н., Янышев Д.С.* Математическое моделирование аэродинамической интерференции между отделяемой полезной нагрузкой и самолетом-носителем // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 22–37. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-22-37

#### **Сведения об авторах:**

*Быков Леонид Владимирович* — кандидат технических наук, доцент кафедры авиационно-космической теплотехники Московского авиационного института (национальный исследовательский университет). *Область научных интересов:* высокоэнтальпийные течения, тепломассообмен, газовая динамика, турбулентность, аэродинамика летательных аппаратов. *Контактная информация:* e-mail: bykov@mai.ru

*Пашков Олег Анатольевич* — кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры авиационно-космической теплотехники Московского авиационного института (национальный исследовательский университет). *Область научных интересов:* тепломассообмен, газовая динамика, турбулентность, аэродинамика летательных аппаратов. *Контактная информация:* e-mail: gfon2@yandex.ru

*Правидло Михаил Натанович* — доктор технических наук, директор Научно-исследовательского и лётно-испытательного центра АО «Государственное машиностроительное конструкторское бюро “Вымпел” им. И.И. Торопова». *Область научных интересов:* динамика полета объектов управления, динамика сложных механических систем в составе авиационных комплексов. *Контактная информация:* e-mail: bykov@mai.ru

*Янышев Дмитрий Сергеевич* — кандидат технических наук, доцент кафедры авиационно-космической теплотехники Московского авиационного института (национальный исследовательский университет). *Область научных интересов:* высокоэнтальпийные течения, тепломассообмен, газовая динамика, турбулентность, излучение. *Контактная информация:* e-mail: dyanishev@gmail.com

## NUMERICAL SIMULATION OF AERODYNAMIC INTERFERENCE BETWEEN EJECTED PAYLOAD AND THE PARENT AIRCRAFT

L.V. Bykov<sup>1</sup>, O.A. Pashkov<sup>1</sup>, M.N., Pravidlo<sup>2</sup>, D.S. Yanyshv<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University)  
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation

<sup>2</sup> State Machinery Design Bureau «Vympel»  
90, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125424, Russian Federation

The purpose of this paper is to develop reliable methodology for numerical modeling of the interference between parent aircraft and ejectable payload and to investigate the influence of the interference on aerodynamic characteristics of the payload. An appropriate algorithm for the said problem is proposed. A mathematical model for supersonic flow around a solid body as well as its finite volume discretization process is described. In the presented mathematical model, a turbulence model is added to the Navier-Stokes system of equations. Namely, Menter's SST model was chosen. Coupled solver algorithm is reviewed. Implicit Euler scheme is used for time discretization and Newton's method is implemented to linearize the system of equations.

The specifics of determining the appropriate boundary conditions and nondimensionalization of the aerodynamic coefficients are described. The calculations for the isolated payload were performed on an unstructured grid with 9 million cells and for the payload interfered by the parent aircraft — on a 24 million grid. As a result, the summarized aerodynamic characteristics for the payload were obtained for the isolated payload as well as for the payload in presence of the parent aircraft. The characteristics of the isolated object are compared with the ones of the object in presence of the parent aircraft in two different positions —  $Y_{rel} = 0$  m and  $Y_{rel} = 0.6$  m.

The developed method was verified using wind tunnel data. It was identified that in presence of the parent aircraft, the coefficients of normal and side force are not zero as opposed to the isolated payload. Moving away from the parent aircraft decreases the interference and thus the side force, as well as the pitch and yaw torques. The obtained results show that the proposed method could be used in other cases of aerodynamic interference between moving objects.

**Key words:** aircraft, payload, aerodynamic characteristics, interference, Navier-Stokes equations, turbulence, numerical simulation

### REFERENCES

- [1] McBride B.J., Gordon S., Reno M.A. Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species // National Aeronautics and Space Administration. Office of Management Scientific and Technical Information Program. 1993.
- [2] Barth T.J., Jespersen D. The design and application of upwind schemes on unstructured meshes // Technical Report AIAA-89-0366. AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada. 1989.
- [3] Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. August 1994. No. 32(8). Pp. 1598–1605.
- [4] Bykov L.V., Molchanov A.M., Shcherbakov M.A., Yanyshv D.S. Vychislitel'naja mehanika sploshnyh sred v zadachah aviacionnoj i kosmicheskoy tehniki [Computational continuum mechanics for problems of aerospace engineering]. Textbook. M.: OOO «Lenand» Publ., 2015. 668 p. (in Russ.).
- [5] Venkateswaran S., Weiss J.M., Merkle C.L. Propulsion Related Flowfields Using the Preconditioned Navier–Stokes Equations // Technical Report AIAA-92-3437. AIAA/ASME/SAE/ASEE 28th Joint Propulsion Conference, Nashville, TN. July 1992.
- [6] Weiss J.M., Smith W.A. Preconditioning Applied to Variable and Constant Density Flows // AIAA Journal. November 1995. No. 33(11). Pp. 2050–2057.

- [7] Roe P.L. Characteristic based schemes for the Euler equations // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 18. 337–365. 1986.
- [8] Roe P.L. A survey of upwind differencing techniques // *Lecture Notes in Physics*, 1989, 323, 69.
- [9] Weiss J.M., Maruszewski J.P., Smith W.A. Implicit Solution of the Navier–Stokes Equations on Unstructured Meshes // *Technical Report AIAA-97-2103*. 13th AIAA CFD Conference, Snowmass, CO July 1997.
- [10] Hutchinson B.R., Raithby G.D. A Multigrid Method Based on the Additive Correction Strategy // *Numerical Heat Transfer*. 9. 1986. 511–537.

**Article history:**

Received: October 18, 2017

Accepted: January 10, 2018

**For citation:**

Bykov L.V., Pashkov O.A., Pravidlo M.N., Yanyshv D.S. (2018). Numerical simulation of aerodynamic interference between ejected payload and the parent aircraft. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(1). 22–37. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-22-37

**Bio Note:**

*Leonid V. Bykov* — Candidate of Technical Sciences, Director of the Institute of additional vocational education, associate professor at Aerospace Thermal Engineering Dept., Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow. *Research interests:* high-enthalpy flows, heat and mass transfer, gas dynamics, turbulence, aircraft aerodynamics. *Contact information:* e-mail: bykov@mai.ru

*Oleg A. Pashkov* — Candidate of Technical Sciences, researcher at Aerospace Thermal Engineering Dept., Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow. *Research interests:* heat and mass transfer, gas dynamics, turbulence, aircraft aerodynamics. *Contact information:* e-mail: gfon2@yandex.ru

*Mikhail N. Pravidlo* — Doctor of Technical Sciences, Director of the Scientific Research and Flight Test Centre at “Vympel” State Machine Building Design Bureau, Moscow. *Research interests:* flight dynamics of control objects, dynamics of complex mechanical systems as a part of aircraft systems. *Contact information:* e-mail: gfon2@yandex.ru

*Dmitry S. Yanyshv* — Candidate of Technical Sciences, associate professor at Aerospace Thermal Engineering Dept., Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow. *Research interests:* high enthalpy flows, heat and mass transfer, gas dynamics, turbulence, radiative heat transfer. *Contact information:* e-mail: dyanishev@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-38-45

УДК 678.606.55

## РАСЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ПРИ УСТАНОВКЕ ЗАГОТОВОК НА ОПОРЫ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Ю.В. Белоусов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)  
*Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5/1*

В статье рассмотрены условия надежного закрепления заготовок в приспособлениях, которые являются одним из основных элементов технологической системы. Для расчета погрешности закрепления заготовок в приспособлениях в настоящее время используются эмпирические зависимости, имеющие нелинейный характер. Значения входящих в них коэффициентов приводятся только для заготовок из стали и чугуна. В статье разработана методика расчета погрешности закрепления заготовок при установке на опоры приспособления со сферической головкой, позволяющие достигнуть наибольшей точности базирования. Данная методика предоставляет возможность выполнять расчет указанной погрешности практически для различных условий закрепления заготовок. Получены математические зависимости для расчета погрешности закрепления при обработке заготовок из любых современных машиностроительных материалов. Сравнительный анализ полученных зависимостей для типовых условий силового контакта опорных элементов с заготовкой показал, что погрешность закрепления, рассчитанная по полученным зависимостям с учетом сил трения в области контакта опор приспособления с поверхностью заготовки для заготовок из стали практически совпадает с погрешностью, определенной по приводимым в справочной литературе формулам. Показано, что с уменьшением сил закрепления упругие перемещения в стыке незначительны, и расчет погрешности закрепления можно проводить по упрощенной зависимости.

**Ключевые слова:** погрешность закрепления, контактные деформации, упругая и жестко-пластическая задача

Станочные приспособления являются одним из основных элементов технологической системы. Они предназначены для установки и закрепления заготовок. При базировании заготовке придают определенное положение относительно системы координат станка, что в ряде случаев, делает возможным автоматическое получение размеров. Закрепление заготовок обеспечивает плотный контакт с установочными элементами приспособлений, в результате чего достигается их однозначное базирование и предотвращается смещение под действием сил резания.

Погрешность установки — одна из составляющих общей погрешности обработки. Она состоит из погрешности базирования, погрешности закрепления и погрешности вызванной неточностью самих приспособлений.

При закреплении заготовок в приспособлении возникает погрешность закрепления. Погрешность закрепления — это предельное поле рассеяния положений

установочной поверхности относительно поверхности отсчета в направлении выдерживаемого размера. Рассмотрим эту погрешность более подробно.

Сила закрепления должна надежно прижимать заготовку к установочным элементам приспособления. Смещение измерительной базы под действием силы закрепления складывается из перемещений, вызванных деформациями в зоне контакта опор приспособления с поверхностью заготовки; собственными деформациями заготовки; контактными деформациями в предварительно затянутых стыках. В инженерных расчетах основное внимание уделяют контактным явлениям в стыке опор приспособления — база заготовки. Остальными составляющими обычно пренебрегают, полагая заготовку и приспособление достаточно жесткими. Контактные деформации в предварительно затянутых стыках учитывают при использовании обратимых и переналаживаемых приспособлений с большим количеством стыков. Данная задача особенно актуальна при установке заготовок на сферические опоры.

Зависимость контактных деформаций от сил закрепления носит нелинейный характер. Преобладающие контактные перемещения в стыке опор приспособления с базой заготовки выражаются законом

$$\varepsilon_3 = CP^n \cos \alpha,$$

где  $C$  — коэффициент, характеризующий тип поры, условия ее контакта с заготовкой, материал, твердость, шероховатость, поверхности базы заготовки;  $P$  — сила действующая на опору;  $n$  — показатель степени,  $n < 1$ ;  $\alpha$  — угол между направлением выдерживаемого размера и направлением наибольшего смещения.

Значения  $C$  находят экспериментально. Аналитическое решение получено для ограниченного количества случаев. Аналитические методы расчета контактных деформаций заготовок требуют учета большого количества факторов. Одним из основных препятствий служит необходимость учета параметров качества базовой поверхности заготовки. В справочнике [1] приведены зависимости для определения контактных деформаций при установке заготовок на различные типы опор. Однако значения коэффициента  $C$  приведены только для заготовок из стали и чугуна. Для других материалов данные в литературе отсутствуют. Ввиду большого количества современных машиностроительных материалов возникает необходимость разработки универсальных зависимостей для оценки контактных деформаций на стыке заготовок с установочными элементами приспособлений.

Наибольшая точность базирования наблюдается при установке заготовок на сферические опоры, так как первоначальный контакт каждого установочного элемента и заготовки происходит в точке. Однако и контактные деформации при этом также велики. В зависимости для определения контактных деформаций для данного типа опор в работе [1] не входит шероховатость базовой поверхности заготовки. Поэтому будем считать поверхности опор и заготовок гладкими.

В результате приходим к осесимметричной задаче о сжатии двух идеальных упругопластических тел силой  $P$ , произвольно меняющейся во времени  $t$ . Рассмотрим простую модель, с помощью которой можно аналитически определить зависимость контактных деформаций от  $P(t)$  и получить результаты, хорошо со-

гласующимися с экспериментальными и известными численными данными. Такие зависимости широко используют при решении задач трения и изнашивания, определения механических характеристик методами вдавливания [2–7]. Однако упругопластическая задача об определении  $\delta(P)$  полностью не решена. Для сравнительно небольших значений  $P$  известно численное решение, широкое распространение получили эмпирические и феноменологические зависимости  $\delta(P)$ , однако они не применимы для всех значений  $P(t)$ , или дают значительную погрешность.

Приближенное решение данной задачи можно свести к комбинации известных решений упругой и жесткопластической задачи. Перемещение любой точки контактирующих тел можно представить в виде суммы упругой и пластической составляющих. В работе [8] показано, что исходная задача эквивалентна задаче о вдавливании в первоначально плоскую поверхность упругопластического полупространства с коэффициентом Пуассона  $\nu = 0$ , пластической константой  $k = k_2$  и модулем упругости

$$E = \frac{E_1 E_2}{[(1 - \nu_1^2)E_2 + (1 - \nu_2^2)E_1]} \quad (1)$$

«приведенного» штампа, форму которого определяет зазор между телами

$$z = \frac{0,5r^2}{R}; \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}; \quad R_2 > R_1. \quad (2)$$

В нашем случае  $R_2 = \infty$ , а  $R^{-1} = R_1^{-1}$ .

В формуле (1)  $E_{1,2}$ ,  $\nu_{1,2}$  — величины упругих постоянных тел.

Используем условие текучести Треска—Сен-Венана. Пластические константы тел:  $k_i = 0,5\sigma_{Ti}$  ( $i = 1, 2$ ). Предполагаем, что в области контакта тел трение отсутствует. Сила трения может быть в дальнейшем учтена введением необходимого поправочного коэффициента.

При малых  $P$  деформирование упругое и из решения Герца [3] имеем:

$$\delta = b\sqrt[3]{P^2}; \quad b = \sqrt[3]{\frac{1}{R} \left( \frac{3}{4E} \right)^2};$$
$$q_0 = h\sqrt[3]{P^2}; \quad h = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\left( \frac{4E}{3R} \right)^2}. \quad (3)$$

Среднее давление в контакте не должно превышать бринеллевского, т.е.

$$q_0 \leq \eta k; \quad \eta \approx 5,7.$$

Приращение пластических деформаций происходит при выполнении условий

$$q_0 = \eta k; \quad dP/dt > 0.$$

В этом случае предельные значения  $P_1$ , до которых справедливы формулы (3):

$$P_1 = \chi^3 \left( \frac{3R}{4E} \right)^2; \quad \chi = \pi k \eta. \quad (4)$$

Расчеты показывают, что действительные нагрузки гораздо больше тех, которые получаются по формулам (4). При  $P > P_1$  значения  $q$  и  $a$ , где  $a$  — радиус области контакта, однозначно зависят от силы  $P$  [8]

$$a = \left( \frac{P}{\chi} \right)^{1/2}; \quad q = 1,5k\eta\sqrt{1-\xi^2}; \quad \xi = r/a; \quad r \leq a. \quad (5)$$

Упругое перемещение точек нормальное к поверхности контакта, соответствующее давлению (5), имеет вид [9]:

$$W_e = \delta_e(1-0,5\xi^2); \quad \delta_e = \frac{0,75\chi a}{E}. \quad (6)$$

Полное перемещение точек контакта определяется формой штампа (2) и деформацией  $\delta$ :

$$W = \delta - \frac{0,5a^2\xi^2}{R}; \quad \xi \leq 1. \quad (7)$$

Пластическое смещение в пределах зоны контакта

$$W_p = W - W_e = \delta_p - 0,5\xi^2 \left( \frac{a^2}{R} - \delta_e \right); \quad \delta_p = \delta - \delta_e. \quad (8)$$

Из краевого условия на границе контакта

$$W_p(a, a) = \delta_p - 0,5 \left( \frac{a^2}{R} - \delta_e \right) \quad (9)$$

согласно работе [8] получаем:

$$\delta_p = 0,5(1-\beta) \left( \frac{a^2}{R} - \delta_e \right); \quad \beta = \frac{1}{1-I}; \quad I = 2 \int_1^\infty v_z(\xi) \xi^{-3} d\xi, \quad (10)$$

где  $v_z$  — поверхностная скорость при погружении пологого штампа в упругое полупространство.

Если трение между телами отсутствует, то  $1 - \beta = 0,67$  [8]. Используя выражения (6), (8) и (10) определим  $\delta(P)$  при  $P > P_1$ . Тогда смещение стыка заготовка — опоры приспособления  $\varepsilon_3$ , мкм:

$$\varepsilon_3 = 0,34 \frac{a^2}{R} + 0,67\delta_e. \quad (11)$$

Используя выражения (4) и (5), получим:

$$\varepsilon_3 = 0,04 \frac{P}{\sigma_T R} + 1,5 \frac{\sigma_T}{E} \sqrt{\frac{P}{\sigma_T}}, \quad (12)$$

где  $R$  — радиус сферической опоры приспособления;  $\sigma_T$  — предел текучести материала заготовки.

Выражение (12) можно представить следующим образом:

$$\varepsilon_3 = 0,04 \frac{P}{\sigma_T R} + 1,5 \varepsilon_{\text{ост}} \sqrt{\frac{P}{\sigma_T}}, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_{\text{ост}}$  — остаточная деформация, соответствующая пределу текучести. Обычно  $\varepsilon_{\text{ост}} \approx 0,002$ . Тогда окончательно получим  $\varepsilon_3$ , мкм:

$$\varepsilon_3 = 0,04 \frac{P}{\sigma_T R} + 0,003 \sqrt{\frac{P}{\sigma_T}}. \quad (14)$$

Предел текучести материала  $\sigma_T$ , входящий в формулу (14) легко поддается определению и является одной из основных механических характеристик материала. В отличие от твердости, предел текучести различных марок стали можно легко найти в справочной литературе.

Для сравнения, вычислим погрешность закрепления  $\varepsilon_3$ , используя полученную формулу, и зависимость, предложенную в справочнике [1], которая для стали выглядит следующим образом, мкм:

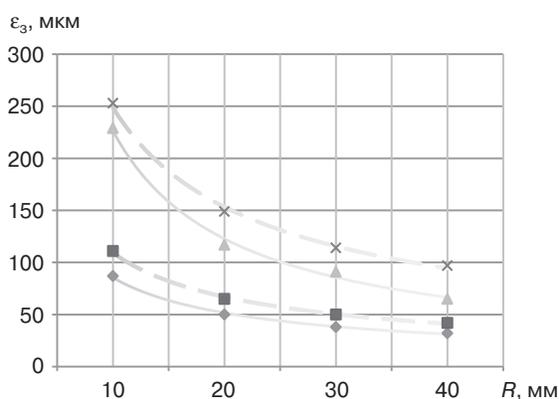
$$\varepsilon_3 = (-0,003 HB + C_1) \left( \frac{P}{9,8} \right)^{0,8}; \quad C_1 = 0,67 + \frac{6,23}{R}. \quad (15)$$

Расчеты выполним для заготовок из стали 35 подвергнутых нормализации. Твердость поверхности заготовок  $HB = 163–192$ , предел текучести  $\sigma_T = 270$  МПа. Размеры сферических опор выбирались по ГОСТу 13441–68. Диаметр опор  $D = 5–40$  мм, радиус опор  $R = D$ . Предельная нагрузка на одну опору составляет  $F_{\text{пред}} = 2–30$  кН.

При определении силы, действующей на одну опору приспособления, будем исходить из того, что заготовка установлена на три опоры, силы закрепления приложены вертикально. Заготовка закреплена в четырех точках. Закрепление производится с помощью резьбовых элементов и прихватов. Сила, приложенная к ключу  $F_{\text{кл}} = 100–300$  Н. Выигрыш в силе для крепежной резьбы (отношение силы затяжки к силе, приложенной к ключу) может достигать 70 и более раз. Тогда  $F_{\text{зат}} = 5000–14000$  кН. Расчеты выполнялись для максимальной и минимальной силы затяжки из данного диапазона. Результаты расчетов приведены на рисунке. Здесь сплошные линии соответствуют расчету по полученной формуле (14), а пунктирные — по зависимости (15). Причем, две верхних линии соответствуют расчетам по максимальной силе затяжки, а две нижних — по минимальной.

Из рисунка видно, что погрешность закрепления, вычисленная по полученной зависимости несколько ниже, чем по формуле (15). Расхождение не превышает 30%. Минимальное расхождение для опор радиуса  $R = 10$  мм (в среднем 15%), а максимальное — для опор радиуса  $R = 40$  мм (в среднем 27%). Данное обстоятельство можно объяснить тем, что при выводе формулы (14) не учитывалось трение в зоне контакта установочных элементов с поверхностью заготовки. Поэтому в формулу (14) следует внести поправочный коэффициент  $k \approx 1,25$ . Тогда в качестве расчетной можно принять следующую зависимость:

$$\varepsilon_3 = 0,05 \frac{P}{\sigma_T R} + 0,004 \sqrt{\frac{P}{\sigma_T}}. \quad (16)$$



**Рис.** Зависимость погрешности закрепления от радиуса сферических опор приспособления  
[**Fig.** Relationship between clamping error and the radius of spherical pin supports of the fixture]

Таким образом, получена компактная универсальная зависимость для определения погрешности закрепления при установке заготовок на сферические опоры приспособления. Следует заметить, что второе слагаемое в формуле (16) выражает в основном упругие перемещения стыка заготовки с опорами приспособления под действием сил закрепления.

Его доля в общем балансе погрешности закрепления сравнительно невелика и уменьшается с уменьшением сил закрепления. Поэтому в этих случаях данным слагаемым можно пренебречь и определять погрешность закрепления по формуле (17).

$$\varepsilon_3 = 0,04 \frac{P}{\sigma_T R}. \quad (17)$$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т. 1. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
- [2] Белоусов Ю.В. Анализ условий надежного закрепления заготовок при токарной обработке на станках с ЧПУ // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 1. С. 91–96.

- [3] Белоусов Ю.В. Моделирование сил взаимодействия инструмента при механической обработке резанием // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 4. С. 62—66.
- [4] Белоусов Ю.В. Расчет допускаемых напряжений для оценки контактной прочности цилиндрических передач при пиковой нагрузке // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 6. С. 29–32.
- [5] Белоусов Ю.В. Расчет напряжений на рабочей поверхности зубьев косозубых цилиндрических передач // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 4. С. 35—38.
- [6] Белоусов Ю.В. Расчет контактных давлений на рабочей поверхности зубьев цилиндрических передач // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 2. С. 63—67.
- [7] Hoffman N.P., Stolz V. (2010). On transient growth of wear pattern properties. *Wear*. 268 (7-8). 886—892.
- [8] Александров В.М., Ромалис Б.Л. Контактные задачи в машиностроении. М.: Машиностроение, 1986. 176 с.
- [9] Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.

© Белоусов Ю.В., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: 13 октября 2017

Дата принятия к печати: 12 января 2018

#### Для цитирования:

Белоусов Ю.В. Расчет погрешности закрепления при установке заготовок на опоры приспособления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 38—45. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-38-45

#### Сведения об авторе:

Белоусов Юрий Вениаминович — кандидат технических наук, доцент кафедры основы конструирования машин Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. *Область научных интересов:* детали машин, технология машиностроения. *Контактная информация:* e-mail: belou.80@mail.ru

## CALCULATION OF CLAMPING ERROR WHEN MOUNTING A WORKPIECE ON FIXTURE SUPPORTS

Yu.B. Belousov

Bauman Moscow State Technical University (National research university of technology)  
5/1, 2-nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russian Federation

This article examines the conditions for reliable clamping of workpieces in fixtures, which are one of the main elements in a technological system. In order to calculate clamping error of workpieces in fixtures empirical relationships of nonlinear character are currently used. Values of the coefficients included in these relationships are only specified for steel or cast iron workpieces. The paper presents

the technique for calculating the clamping error of workpieces mounted on fixture supports with spherical heads, which allow to achieve the greatest locating precision. Practically, this technique allows to perform the calculation of the specified error for different fixturing conditions of workpieces. Mathematical relationships for calculation of the error for machining workpieces of any modern engineering materials are obtained. Comparative analysis of the obtained relationships for the standard conditions of force contact of the support elements with the workpiece showed that the clamping error calculated in accordance with the obtained relationships and taking into account friction forces in the contact area of the supports with the surface of steel workpiece almost coincides with the error determined by formulas given in the reference literature. It is demonstrated that with the decrease in clamping force the elastic displacements at the interface are negligible and the clamping error can be calculated through a simplified relationship.

**Key words:** clamping error, contact deformation, elastic and rigid plastic problem

## REFERENCES

- [1] Dalsky A.M., Kosilova A.G., Meshcheryakov, R.K. (2001). *Spravochnik tehnologa mashinostroitelja* [Mechanical technologist handbook]. In 2 t. Vol 1. Moscow: Mashinostroenie publ. 912. (in Russ.).
- [2] Belousov Yu.V. (2017). Analysis conditions for reliable attach of workpieces during lathe machining on the mashines with numerical soft-ware control. *RUDN Journal of engineering researches*. Vol. 18. No. 1. 91–96. (in Russ.).
- [3] Belousov Yu.V. (2016). Modeling of force interaction of the tool during mechanical machining. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. No. 4. 62–66. (in Russ.)
- [4] Belousov Yu.V. (2015). Calculation of the admissible tensile stresses to appreciate contact strength of spur gears at the unfavorable loading. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. No. 6. 29–32. (in Russ.).
- [5] Belousov Yu.V. (2015). Calculation of the stresses on the working surface of the teethes of oblique angle spur gears. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. No. 4. 35–38. (in Russ.).
- [6] Belousov Yu.V. (2014). Calculation of contact pressure on the working surface of the teeth of spur gearing. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. No. 2. 63–67. (in Russ.).
- [7] Hoffman N.P., Stolz V. (2010). On transient growth of wear pattern properties. *Wear*. 268 (7-8). 886–892.
- [8] Aleksandrov V.M., Romalis B.L. (1986). *Kontaktnye zadachi v mashinostroenii* [Contact problems in mechanical engineering]. M.: Mashinostroenie publ. 176 p. (in Russ.).
- [9] Galin L.A. (1980). *Kontaktnye zadachi teorii uprugosti i vjzskouprugosti* [Contact problems of the theory of elasticity and viscoelasticity]. Moscow: Mashinostroenie publ. 304. (in Russ.).

### Article history:

Received: October 13, 2017

Accepted: January 12, 2018

### For citation:

Belousov Yu.V. (2018). Calculation of clamping error when mounting a workpiece on fixture supports. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(1). 38–45. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-38-45

### Bio Note:

*Yury V. Belousov* — Doctor of Technical Sciences, associate professor, Department of Bases of Machine Design, Bauman Moscow State Technical University (National research university of technology). *Research interests:* machine parts, mechanical engineering technology. *Contact information:* e-mail: belou.80@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-46-58

УДК 621.01

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

Е.А. Рожкова<sup>1,2</sup>, С.В. Четвериков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения  
Российская Федерация, 664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15

<sup>2</sup> Забайкальский институт железнодорожного транспорта  
Российская Федерация, 672040, Чита, ул. Магистральная, 11

В машиностроении наиболее часто применяются следующие профильные соединения: с тремя гранями (РК-3); с тремя срезанными (РК<sub>с</sub>-3); с четырьмя срезанными (К<sub>с</sub>-4) и с пятью гранями (РК-5 и РК<sub>с</sub>-5). Несмотря на значительные результаты, в области изучения напряжений и деформаций при контактно-взаимодействии твердых тел разнообразных форм остаются нерешенным ряд задач представляющих научную и практическую ценность. Как показал анализ теоретических и экспериментальных исследований неподвижных разъемных и неразъемных соединений (цилиндрических, профильных) остаются нерешенными задачи, в частности по выбору геометрической формы контурных кривых, величины натяга профильных неподвижных, неразборных соединений с равноосным контуром. Работоспособность и надежность РК-профильных соединений с натягом определяется их прочностью, т.е. способностью элементов сопротивляться их относительному смещению в процессе эксплуатации. В целях определения работоспособности РК-профильного соединения с натягом по критерию прочности необходимо вычислять напряжения и деформации, возникающие во втулке с РК-профильным отверстием от действия РК-профильного вала, установленного в ступицу с натягом. В статье рассмотрена методика проведения экспериментальных исследований методом тензометрии для оценки влияния конструктивных параметров и внешних нагрузок на напряженно — деформированное состояние деталей соединения. По результатам исследований были составлены таблицы сравнительных характеристик рекомендуемых типов посадок с натягом для РК-3 профильных соединений, а также рекомендуемых посадок с натягом при соответствующих значениях  $n$  РК-3 профильных соединений вал-ступица применительно к зубчатым передачам.

**Ключевые слова:** РК-профильный вал, РК-профильное отверстие, натяг, конструктивные параметры

Неподвижные соединения с натягом широко применяются в изделиях машиностроения. Это обусловлено их большей по сравнению со шпоночными, сварными, клеевыми и тому подобными соединениями технологичностью, меньшей трудоемкостью изготовления, сравнительно низкой себестоимостью. Кроме того, соединения с натягом обеспечивают хорошее центрирование сопрягаемых деталей и могут воспринимать значительные статические и динамические нагрузки [1; 4].

К недостаткам цилиндрических соединений с натягом можно отнести: высокую трудоемкость сборки при больших натягах, возможность повреждения посадочных поверхностей при этом; высокую концентрацию напряжений на сопрягаемых поверхностях элементов соединения; склонность к контактной коррозии и, как следствие, пониженную прочность соединения при переменных нагрузках; отсутствие жесткой фиксации деталей относительно друг друга [1; 4]. Также недостатком цилиндрических соединений с натягом является невозможность допущения даже однократной их перегрузки. Перегрузка может вызвать смещение соединяемых деталей и окончательное разрушение посадки.

Достоинства РК -3 профильных соединений с гарантированным натягом в сравнении с цилиндрическими соединениями, заключается в том, что профильные соединения, как правило, способны воспринимать большие эксплуатационные нагрузки, чем цилиндрические сопряжения, за счет геометрического замыкания профильных кривых [1; 4]. Также РК-профильные соединения обеспечивают снижение материалоемкости изделий. К недостаткам профильных соединений можно отнести наличие распорных усилий.

Работоспособность и надежность РК-3 профильных соединений с натягом определяется их прочностью, т.е. способностью элементов сопротивляться их относительному смещению в процессе эксплуатации.

В целях определения работоспособности РК-профильного соединения с натягом по критерию прочности необходимо определить напряжения и деформации, возникающие во втулке с РК-профильным отверстием от действия РК-профильного вала установленного в ступицу с натягом [3; 4].

Для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния узлов машин применяются методы и средства, в которых использованы различные принципы измерения.

Поляризационно-оптический метод исследования напряжений (метод фотоупругости) — экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций на прозрачных моделях из оптически чувствительных материалов. Поляризационно-оптические методы, позволяют исследовать не только напряженное состояние взаимодействующих тел по всему объему и определить составляющие тензора напряжений, но и визуально проследить, как изменяется положение взаимодействующих тел относительно друг друга при реализации различных схем нагружения.

Поляризационно-оптический метод исследования напряжений РК-профильного соединения вала и ступицы с зазором применялся в работах [2; 8]. В данной работе в качестве материала моделей применялся оптически-активный компаунд на основе эпоксидной смолы отвержденной малеиновым ангидридом МГТФА. Каждая модель сопряжения представляла собой ступицу и вал с равноосным контуром собранные с зазором. Оценка общей картины напряженного состояния модели РК-профильного соединения и фотографирование картин полос проводилось на большой поляризационной установке БПУ-ИМАШ-КБ2. Различные схемы нагружения моделей испытывали на специальном нагрузочном приспособлении.

Исследование напряженного состояния моделей РК-профильного соединения сопровождалось фотографической регистрацией картин полос в монохроматическом свете с последующей зарисовкой на миллиметровой бумаге. В процессе эксперимента были исследованы следующие схемы нагружения: передача крутящего момента и радиальной силы; передача крутящего момента; передача радиальной силы. Численное значение величин контактных углов и их относительное положение определялось непосредственным измерением на миллиметровой бумаге, по выходу на границу раздела втулки и вала интерференционной полосы нулевого порядка.

Порядок полосы определяли подсчетом числа полос для каждой контактной зоны в сопряжении из общей картины напряженного состояния, которую фиксировали на фотографии или на экране БПУ. Цену полосы материала определяли экспериментально на координатно-синхронном поляриметре КСП-7. В результате были получены графические зависимости углов контакта от нагрузки, численные значения максимальных касательных и нормальных напряжений, картин полос интерференции для трех моделей РК-профильного соединения, изготовленных с разными радиальными зазорами, которые могут характеризовать напряженное состояние РК-профильного соединения деталей машин при передаче внешних нагрузок.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что поляризационно-оптический метод исследования напряжений актуален для исследования напряженного состояния РК-профильного соединения вала и ступицы собранного по посадкам с зазором. Использование поляризационно-оптического метода для исследования напряженного состояния РК-профильного соединения вала и ступицы собранного по посадкам с натягом представляется не возможным, так как нельзя создать соединение с натягом из отвержденной эпоксидной смолы. В виду того, что отвержденная эпоксидная смола не обладает достаточной прочностью и упругостью и при создании посадок с различными натягами произойдет разрушение моделей. Для использования данного метода исследования напряжений необходимо наличие специального технологического оборудования, непосредственно поляризационной установки [2].

Поэтому наиболее целесообразно для исследования напряженного состояния РК-профильного соединения вала и ступицы собранного по посадкам с натягом использовать метод тензометрии. При данном методе создание экспериментальных моделей не требует использования специальных материалов, и создание посадки с натягом наиболее возможно.

Большое распространение для исследования напряжений и деформаций получила тензометрия, основанная на применении тензорезисторных преобразователей (тензорезистор, тензодатчик) [5; 8].

Для исследования напряженного состояния РК-профильного соединения вала и ступицы с числом граней равным трем, собранного по посадкам с натягом использовались тензодатчики фирмы НВМ тип 1-LY11-6/350.

Точность и надежность работы тензодатчиков зависят от качества закрепления датчика и его выводов на измеряемом объекте или промежуточном преобразова-

тельном элементе. Так как база чувствительного элемента мала, требуется осторожность при работе с тензодатчиками.

Поэтому сначала производилась механическая тщательная подготовка и очистка рабочей поверхности для тензодатчика, причем подготавливаемая площадь в 1,5–2 раза превышает площадь занимаемую датчиком, далее размечалась рабочая поверхность для правильной ориентации тензодатчика, обезжиривалась рабочая поверхность, и выполнялась аппликация тензодатчиков с использованием цианакрилатного клея Z70 холодного отвердевания. Минимальная продолжительность отвердевания, по истечении которого можно начинать измерения, составляет 15 мин для статических измерений при температуре склеивания 20 °С и относительной влажности воздуха от 30 до 80%.

Прежде чем приступить к измерениям тех или иных параметров непосредственно в деталях, необходимо было произвести тарировку датчиков в целях определения надежности показаний, а также для определения текущего масштаба, зависящего от настройки усилительной аппаратуры. Тарировка датчиков производилась на балке равного сопротивления изгибу в лаборатории сопротивления материалов ЗаБИЖТ следующим образом. Из партии датчиков с одинаковым номинальным сопротивлением отбирались 5% и каждый из них наклеивался на балку. Методика тарировки заключается в определении ожидаемого среднего разброса показаний датчиков, измеряемого в процентах. После снятия показаний получилось, что эта величина лежит в пределах 1%, и вся партия датчиков может считаться годной для измерений.

Для проведения экспериментальных исследований использовался цифровой измеритель деформации тензометрический ИДТЦ-01, позволяющий измерять деформации тензорезисторов сопротивлением от 100 до 400 Ом при статическом нагружении конструкций, имеющий 11 измерительных каналов, диапазон измерений мкОм/Ом —  $\pm 5999$ . Электрическая схема соединений тензорезисторов на объекте измерений — полумост, напряжение питания полумоста  $9 \pm 2$  В. Стабильность показаний при неоднократных измерениях деформации, единиц индикации — не более 5.

Прежде чем производить измерения с использованием измерителя деформаций необходимо знать значение коэффициента цены деления, которое определялось также с помощью специальной тарировочной балки равного сопротивления консольного типа.

Относительные продольные деформации в любой точке на поверхности балки будут равны между собой и постоянны [7]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6Fl}{Eb_0h^2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — относительная продольная деформация;  $E$  — модуль упругости при растяжении,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

Учитывая, что деформации  $\varepsilon$  постоянны, можно определить цену деления измерителя деформации и сравнить с данными по паспорту. Поскольку шкала тен-

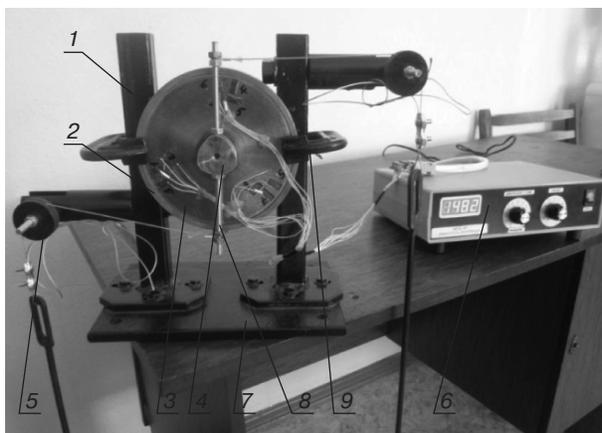
зометрической установки протарирована непосредственно в единицах деформации, то цена деления шкалы определяется по формуле

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\Delta n_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где  $\Delta n_{\text{ср}}$  — среднее значение разности отсчетов относительных деформаций по трем датчикам по шкале измерителя деформации.

Следовательно, цена деления измерителя деформации будет равна  $1 \cdot 10^{-6}$ .

Дальнейшей задачей исследований было проведение натуральных экспериментальных испытаний РК — профильных соединений с гарантированным натягом на прочность. Для решения данной задачи было разработано и изготовлено в ДКТБ ЗаБЖД нагрузочное устройство для испытания РК-3 профильного соединения с натягом (рис. 1). Данное устройство предназначено для реализации различных схем нагружения и соотношений  $n = D/D_m$ , где  $D$  — наружный диаметр ступицы, мм;  $D_m$  — средний диаметр отверстия в ступице, мм [3–6].



**Рис. 1.** Нагрузочное устройство для испытания РК-3 профильного соединения с натягом: 1 — стойка; 2 — крепежное кольцо; 3 — ступица; 4 — вал; 5 — штанга с роликами; 6 — измеритель деформации ИДТЦ-01; 7 — установочная плита; 8 — рычаг (плечо); 9 — струбцины  
[Fig. 1. Load device for testing of P-3 profile interference fit: 1 — stand; 2 — fixing ring; 3 — nave; 4 — shaft; 5 — bar with rollers; 6 — digital strain gauge; 7 — mounting plate; 8 — lever arm; 9 — clamps]

Нагрузочное устройство состоит из плиты, на которую с помощью болтов устанавливаются две стойки. К стойкам прикрепляются две штанги с роликами, а также двумя струбцинами — РК-3 профильное соединение. Нагрузка на образец в виде крутящего момента создается с помощью грузов, которые устанавливаются на гиревой подвес. Используя данное нагрузочное устройство и цифровой измеритель деформации ИДТЦ-01, с помощью способа тензометрии были проведены экспериментальные исследования образцов РК — профильных соединений с натягом.

Аппликация тензодатчиков производилась по трем площадям контакта в местах, где действует наибольшая радиальная сила — в форме прямоугольной розетки и в направлении наименьшей толщины ступицы (рис. 2). Направление наи-

большей деформации определялось поляризационно-оптическим методом согласно результатам, приведенным в работе [2].



**Рис. 2.** Схема расположения тензодатчиков  
[Fig. 2. Scheme of strain gauges' arrangement]

При этом была собрана полумостовая схема, тензодатчики подключены в двух направлениях РК-профильной ступицы для каждой зоны контакта, по предлагаемым традиционным схемам их установки согласно работам [3–7].

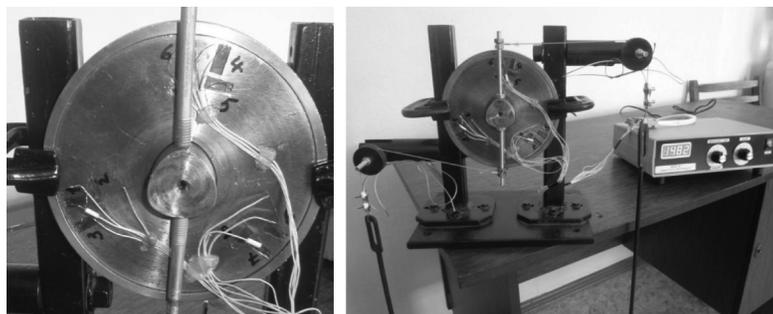
Эксперимент проводился для соединения, выполненного по посадке с натягом Н7/г6 для различных диаметров ступиц 130, 100 и 70 мм, т.е. для различных соотношений  $n = D/D_m$  (табл. 1).

Первый эксперимент проводился для  $n = 4$  (рис. 3).

Таблица 1

**Значения  $n$  для различных соотношений диаметров**  
[Numerical values of  $n$  for various ratios of diameters]

$n$	$D$ , мм	$D_m$ , мм
4	130	32,86
3	100	32,86
2	70	32,86



**Рис. 3.** Экспериментальный стенд ( $n = 4$ )  
[Fig. 3. Experimental stand ( $n = 4$ )]

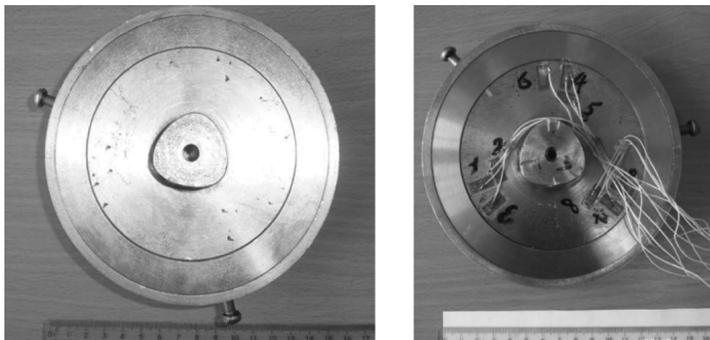
Эксперимент проводился следующим образом, с помощью грузов прикладывался крутящий момент, действующий на вал. От действия нагрузки возникала деформация ступицы в радиальном направлении. В результате измерений были

получены показания для тензодатчиков по трем площадям контакта на приборе ИДТЦ-01. Показания снимались до приложения нагрузки и после приложения нагрузки, разность этих показаний и есть возникающая деформация.

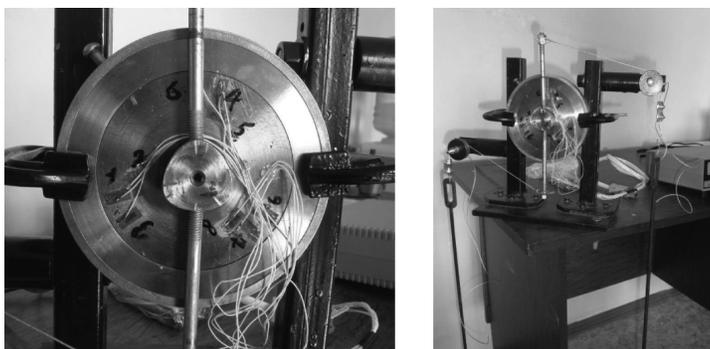
Для проведения эксперимента со ступицами меньшего диаметра, изготавливались переходные кольца, необходимые для крепления соединения к нагрузочно-му устройству (рис. 4).

Второй эксперимент для  $n = 3$  проводился аналогично первому (рис. 5).

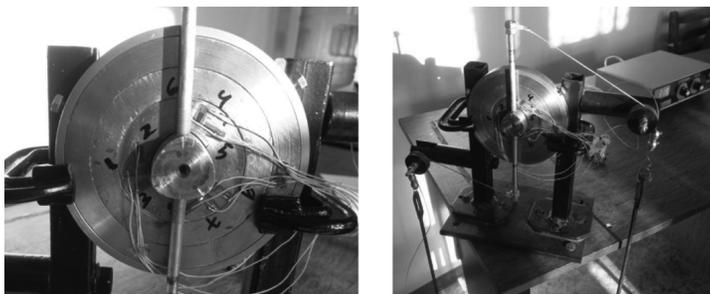
Третий эксперимент проводился для  $n = 2$  (рис. 6).



**Рис. 4.** Закрепление ступицы в кольцах  
[**Fig. 4.** Fixing of a nave in rings]



**Рис. 5.** Экспериментальный стенд ( $n = 3$ )  
[**Fig. 5.** Experimental stand ( $n = 3$ )]



**Рис. 6.** Экспериментальный стенд ( $n = 2$ )  
[**Fig. 6.** Experimental stand ( $n = 2$ )]

Относительную деформацию тензодатчика можно определить по формуле [7]

$$\varepsilon_i = \Delta c_i K_\varepsilon, \quad (3)$$

где  $\Delta c_i$  — разность показаний тензометрической установки,  $\Delta c_i = c_i - c_0$ ;  $c_0$  — начальное показание тензометрической установки при недеформированной решетке тензодатчика;  $c_i$  — показание тензометрической установки при деформированной решетке тензодатчика;  $K_\varepsilon$  — цена деления шкалы ИДТЦ-01,  $K_\varepsilon = 10^{-6}$ .

Эксперимент проводился для 10 соединений, выполненных по посадке с натягом  $H_7/r_6$  для  $n = 4$ ,  $n = 3$ ,  $n = 2$ . Для каждого соединения было выполнено по три измерения, так как рассматривались три зоны контакта. В результате для каждого  $n$  было получено по 30 значений.

Для определения деформаций в радиальном направлении от действия сосредоточенной распорной силы для подключения тензодатчиков использовалась форма розетки — прямоугольная двухэлементная. В такой форме, решетки расположены по двум осями, расположенным под прямым углом, и используется для моноосевого измерения напряжения. Также прямоугольная форма розетки, используется для измерения деформаций сдвига.

При прямоугольной форме розетки максимальные нормальные деформации определяются по формуле [7]

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  — деформация 1-го и 2-го тензодатчиков;  $\mu$  — коэффициент Пуассона для углеродистой стали,  $\mu = 0,24-0,28$ .

Минимальные нормальные деформации [7]

$$\varepsilon_{\min} = \varepsilon_1 - \mu\varepsilon_2, \quad (5)$$

Максимальные деформации сдвига [7]

$$\tau_{\max} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2. \quad (6)$$

В результате были определены деформации в радиальном направлении по наименьшей толщине ступицы, а также максимальные и минимальные нормальные деформации от действия крутящего момента для соединения, выполненного по посадке с натягом  $H_7/r_6$  для  $n = 4$ ,  $n = 3$ ,  $n = 2$ .

Пересчет измеренных деформаций в эквивалентные значения механических напряжений производится на основании следующих соотношений [8]:

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{\max} + \mu\varepsilon_{\min}); \quad (7)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_{\min} + \mu\varepsilon_{\max}), \quad (8)$$

где  $E$  — модуль упругости, МПа,  $E = 2 \cdot 10^5$ ;  $\mu$  — коэффициент Пуассона,  $\mu = 0,24-0,28$ .

В результате были определены максимальные и минимальные напряжения для трех зон контакта для соединения, выполненного по посадке с натягом  $H_7/r_6$  для  $n = 4, n = 3, n = 2$ . Одним из условий применимости регрессионного анализа является воспроизводимость эксперимента, т.е. однородность случайных ошибок результатов наблюдений в различных опытах. Количественной мерой ошибок служит выборочная дисперсия.

Статистическая обработка результатов экспериментов заключалась в определении однородности дисперсий и адекватности результатов расчета. В результате проверки по критерию Фишера, установлено, что результаты расчетов адекватны при 5%-м уровне значимости, описываемому процессу контактного взаимодействия РК-профильных деталей с натягом.

По результатам расчетов были составлены таблицы сравнительных характеристик для выбора конструктивных параметров РК-3 профильного соединения с натягом в зависимости от внешней нагрузки (табл. 2, 3) [8].

Таблица 2

**Сравнительные характеристики рекомендуемых типов посадок с натягом для РК-3 профильных соединений при  $n = 1,4; 1,5; 1,6; 1,8$  и  $M = 200$  Н·м ( $D_m = 32-50$  мм,  $e = 1,12-1,8$  мм,  $N = 3$ )**  
[Comparative characteristics of the recommended types of interference fits for P-3 profile connection at  $n = 1,4; 1,5; 1,6; 1,8$  and  $M = 200$  of N · m ( $D_m = 32-50$  mm,  $e = 1,12-1,8$  mm,  $N = 3$ )]

Тип посадки [Fit type]	$n = D/D_m$	$N_r$ , мкм	Максимальные расчетные напряжения, МПа [Maximum stress, МПа]		Радиальные перемещения $\delta_{max}$ , мкм [Radial displacement, micron]
			на растяжение [tensile]	на сжатие [compressive]	
$H_7/r_6$	1,4	4,5	245,9	257,9	26,5
		25	253,6	265,9	27,3
	1,5	4,5	162,9	172,6	16,5
		25	168,1	178,1	17,1
	1,6	4,5	117,1	125,4	11,0
		25	120,8	129,3	11,4
	1,8	4,5	70,1	76,5	8,8
		25	72,3	78,9	9,1
$H_7/s_6$	1,4	9	247,2	259,2	26,6
		29,5	253,7	266,1	27,4
	1,5	9	163,8	173,5	16,6
		29,5	168,1	178,1	17,1
	1,6	9	117,7	126,1	11,1
		29,5	120,8	129,4	11,4
	1,8	9	70,5	76,9	8,9
		29,5	72,3	79,0	9,1
$H_7/p_6$	1,4	0,5	244,1	255,9	26,3
		21	252,3	264,6	27,2
	1,5	0,5	161,7	171,3	16,4
		21	167,2	177,1	17,0
	1,6	0,5	116,2	124,5	10,9
		21	120,2	128,7	11,3
	1,8	0,5	69,6	76,0	8,7
		21	71,9	78,5	9,0

Тип посадки [Fit type]	$n = D/D_m$	$N_r$ , мкм	Максимальные расчетные напряжения, МПа [Maximum stress, МПа]		Радиальные перемещения $\delta_{\max}$ , мкм [Radial displacement, micron]
			на растяжение [tensile]	на сжатие [compressive]	
$H_7/t_6$	1,4	14,5	251,6	263,9	27,1
		35	260,6	273,3	28,1
	1,5	14,5	166,7	176,6	16,9
		35	172,7	182,9	17,5
	1,6	14,5	119,8	128,3	11,3
		35	124,1	132,9	11,7
	1,8	14,5	71,7	78,3	9,1
		35	74,3	81,1	9,3

Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований РК-3 профильных соединений с натягом, а также анализ опыта применения данных соединений в различных узлах машин и механизмов [3–7], в зависимости от конструктивного параметра  $n$ , а также значения внешней нагрузки следует применять ряды посадок с натягом (табл. 4).

Таблица 3

**Рекомендуемые посадки с натягом для зубчатых передач с РК-3  
профильным соединением вал-ступица**  
[The recommended interference fits for tooth gearings with P-3  
profile shaft-nave connection]

Соотношение диаметров, [Ratio of diameters] $n = D/D_m$	Крутящий момент $M_r$ , Н·м [Torque]	Модуль, мм [Magnitude]	Степень точности передачи [Transfer accuracy degree]	Рекомендуемые типы посадок [Recommended types of fits]	Применяемые марки сталей для изготовления деталей соединения [Applied steel grades for production of parts with the connection]
1,4	5–200	1–3,5	7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	45, 40X, 40ХН, 20X, 18ХГТ, 12ХНЗА
		3,5–6,3	6, 7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6$	
1,5	5–200	1–3,5	6, 7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
		3,5–6,3		$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
1,6	5–200	1–3,5	6, 7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
		3,5–6,3		$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
1,8	5–200	1–3,5	6, 7, 8, 9	$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	
		3,5–6,3		$H_7/r_6, H_7/s_6,$ $H_7/p_6, H_7/t_6$	

В основном в машиностроении для зубчатых передач, к размерам которых не предъявляют высоких требований, применяют марки сталей 45 и 40X с последующей термообработкой [6].

В результате экспериментальных исследований были определены деформации в радиальном направлении по наименьшей толщине ступицы, а также максимальные и минимальные нормальные деформации от действия крутящего момента для соединения, выполненного по посадке с натягом  $H_7/r_6$  для  $n = 4, n = 3, n = 2$ . Экспериментальным путем установлено, что изменения максимальных и

минимальных напряжений для трех зон контакта РК-3 профильного соединения носит линейный характер. Статистическая обработка результатов экспериментов заключалась в определении однородности дисперсий и адекватности результатов расчета. В результате проверки по критерию Фишера, установлено, что результаты расчетов адекватны при 5%-м уровне значимости, описываемому процессу контактного взаимодействия РК-профильных деталей с натягом.

По результатам расчетов были составлены таблицы сравнительных характеристик рекомендуемых типов посадок РК-3 профильного соединения для зубчатых передач при выборе конструктивного параметра  $n$  и внешней нагрузки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Григорьева О.А. Технологическое обеспечение прочности профильных неподвижных соединений упругопластическим деформированием элементов соединения: дисс. ... канд. техн. наук. Омск, 2004. 138 с.
- [2] Ильиных В.А. Расчет и выбор конструктивных параметров профильных соединений с равноосным контуром: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1987. С. 10–15.
- [3] Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Изготовление образцов и разработка экспериментального стенда для испытания РК-3 профильного соединения на прочность // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 3(31). 246 с.
- [4] Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Расчет на прочность РК-3 профильных соединений с натягом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 17–21.
- [5] Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Экспериментальные исследования РК-3 профильных соединений с натягом. Транспортная инфраструктура Сибирского региона / Материалы четвертой всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 13–17 мая 2013 г. Иркутск: ИрГУПС, 2013. Т. 2. С. 349–352.
- [6] Рожкова Е.А. Выбор конструктивных параметров РК-3 профильных соединений для различных условий эксплуатации // Системы. Методы. Технологии. Братск: БрГУ, 2014. № 1(21). С. 40–45.
- [7] Рожкова Е.А., Ильиных В.А., Ярилов В.Е. Анализ напряженно-деформированного состояния взаимодействия деталей РК-3 профильного соединения с натягом методом конечных элементов (МКЭ) // Вестник СамГУПС. Самара: СамГУПС, 2016. № 4. С. 35–41.
- [8] Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие / под ред. канд. техн. наук Р.А. Маркова. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.

© Рожкова Е.А., Четвериков С.В., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: 9 октября 2017

Дата принятия к печати: 11 января 2018

#### Для цитирования:

Рожкова Е.А., Четвериков С.В. Методика проведения экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния профильных соединений с натягом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 46–58. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-46-58

#### Сведения об авторах:

Рожкова Елена Александровна — кандидат технических наук, доцент кафедры подвижного состава железных дорог Иркутского государственного университета путей сообщения

филиала Забайкальского института железнодорожного транспорта. *Область научных интересов*: машиноведение, системы приводов и детали машин. *Контактная информация*: e-mail: helenuys@mail.ru

*Четвериков Сергей Владимирович* — кандидат технических наук, доцент кафедры подвижного состава железных дорог Иркутского государственного университета путей сообщения филиала Забайкальского института железнодорожного транспорта. *Область научных интересов*: Машины, агрегаты и процессы. *Контактная информация*: e-mail: helenuys@mail.ru

## TECHNIQUE FOR CONDUCTING EXPERIMENTAL STUDIES ON STRESS-STRAIN STATE OF P-3 PROFILE INTERFERENCE FITS

E.A. Rozhkova<sup>1,2</sup>, S.V. Chetverikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk state transport university  
15, Chernyshevsky str., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
<sup>2</sup> Transbaikal Institute of Railway Transport  
11, Magistralnaya str., Chita, 672040, Russian Federation

In mechanical engineering the following profile connections are applied most often: with three sides (P-3); with three cut off sides (PC-3); with four cut off sides (PC-4) and with five sides (P-5 and PC-5). Despite considerable results, in the field of studying of stresses and deformations at contact interaction of solid bodies of various forms there is an unresolved number of tasks, which are of scientific and practical value. As the analysis of theoretical and experimental studies of motionless detachable and non-detachable connections (cylindrical, profile) has shown, there are unresolved tasks, in particular regarding the choice of geometrical form of contour curves, the magnitude of interference fit of motionless, non-detachable profile connections with equiaxial contour. The working capacity and reliability polygon profile connections with interference fit is defined by their strength, that is ability of elements to resist strain when in use. For the purpose of determination of working capacity of polygon profile connections with interference fit with respect to strength, stresses and deformations arising in hub with polygon profile opening from the action of polygon profile shaft installed in a nave with interference fit. The article considers the technique of conducting experimental studies by strain-gauging method for the purpose of assessing the influence of structural parameters and external loadings on stress-strain state of parts of the connection. Based on the experimental results tables of comparative characteristics of the recommended types of interference fits for P-3 profile connections and also the recommended interference fits for the corresponding n values of P-3 profile shaft-nave connections applied for tooth gearings were composed.

**Key words:** polygon profile shaft, polygon profile opening, interference fit, structural parameters

### REFERENCES

- [1] Grigorieva O.A. Tehnologicheskoe obespechenie prochnosti profil'nyh nepodviznykh soedinenii uprogoplasticheskim deformirovaniem elementov soedineniya [Technological provision of strength of motionless profile connections by elasto-plastic deformation of elements of connection]. Cand. of Science in Engineering (Dissertation). Omsk: Ohm of GTU, 2004. (in Russ).
- [2] Ilinykh V.A. Raschet i vybor konstruktivnykh parametrov profil'nykh soedinenii s ravnoosnym konturom [Calculation and choice of structural parameters for profile connections with equiaxial contour]. Author's thesis. ... Cand.Tech.Sci. Moscow: MVTU publ., 1987. P. 10–15. (in Russ).

- [3] Rozhkova E.A., Ilinykh V.A. Sample fabrication and experimental stand development for testing RK-3 profile joint toughness. *Modern technologies. System analysis. Modeling. Scientific journal.* Irkutsk: IrGUPS publ., 2011. No. 3(31). 246 p. (in Russ).
- [4] Rozhkova E.A., Ilinykh V.A. The calculation on toughness of rk-profile connection. *Sovremennye tehnologii. Sistemyj analiz. Modelirovanie.* 2012. No. 2 (34). P. 17–21. (in Russ).
- [5] Rozhkova E.A., Ilinykh V.A. Eksperimental'nye issledovaniya RK-3 profil'nyh soedinenii s natyagom [Experimental studies of P-3 profile connections with interference fit]. *Transport infrastructure of the Siberian region: Materials of the fourth All-Russian scientific and practical conference with the international participation, on May 13–17, 2013* Irkutsk: In 2 t. Irkutsk: IrGUPS publ., 2013. (in Russ).
- [6] Rozhkova E.A. Choosing design parameters of the profile connections with three-edged equiaxed shape for different working conditions. *Systems. Methods. Technologies.* Bratsk: BRGU, 2014. No. 1(21). P. 40–45. (in Russ).
- [7] Rozhkova E.A., Ilinykh V.A., Yarilov V.E. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vzaimodeistviya detalei RK-3 profil'nogo soedineniya s natyagom metodom konechnyh elementov (MKE) [Stress-strain state analysis of interaction of parts of P-3 profile connection with interference fit by finite element method (FEM)]. *The messenger of SAMGUPS, Samara: SamGUPS publ., 2016.* No. 4. P. 35–41. (in Russ).
- [8] Tenzometriya v mashinostroenii [Strain-gauging in mechanical engineering]. *Handbook. Under the editorship of Cand.Tech.Sci. R.A. Makarov.* Moscow: Mechanical engineering publ., 1975. 288 p. (in Russ).

**Article history:**

Received: October 09, 2017

Accepted: January 11, 2018

**For citation:**

Rozhkova E.A., Chetverikov S.V. (2018). Technique for conducting experimental studies on stress-strain state of P-3 profile interference fits. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19 (1). 46–58. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-46-58

**Bio Note:**

*Elena A. Rozhkova* — Candidate of Technical Sciences, associate professor at “The rolling stock of the railroads” department, Irkutsk state transport university. *Research interests:* machine science, drive systems, machine parts. *Contact information:* e-mail: helenuys@mail.ru

*Sergey V. Chetverikov* — Candidate of Technical Sciences, associate professor at “The rolling stock of the railroads” department, Irkutsk state transport university. *Research interests:* machines, units and processes. *Contact information:* e-mail: helenuys@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-59-66

УДК 626-31

## К ВОПРОСУ О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДОЛЬНО-ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Н.К. Пономарев, Л.Е. Щесняк

Российский университет дружбы народов  
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

В последнее время в практике гидротехнического строительства применяются водосбросы с продольно-циркуляционным течением. Отмеченные свойства продольно-циркуляционных течений служат уникальным примером совместимости типа течения с технологическим назначением водосбросного сооружения. Гидравлические характеристики течения (пропускная способность, распределение скорости, распределение давления, прогноз кавитации и др.) определяются на основе использования методов расчета, разработанных в упомянутых исследованиях, а именно: для продольно-осевого течения используются известные стандартные методы расчета; продольно-циркуляционного течения, взаимодействующие с твердыми границами водосброса; продольно-циркуляционного течения, в виде закрученной струи в водной среде или в воздухе; течение, возникающее при взаимодействии однонаправленных продольно-циркуляционных потоков; течение, возникающее в результате взаимодействия противоположно закрученных коаксиальных потоков. В данной работе авторы рассматривают продольно-циркуляционное течение вязкой несжимаемой жидкости в закрытом канале и в струе с использованием вурфа скоростей, связывающего между собой три компоненты скорости  $U$ ,  $V$  и  $W$ . Вурф позволяет не только проследить принадлежность некоторого параметра тому или иному процессу, характер его изменения, но и определить «полноту» ряда показателей, относящихся к нему.

**Ключевые слова:** шахтные вихревые водосбросы, продольно-циркуляционное течение, вурф скоростей, тангенциальная скорость, параметр закрутки

### Введение

Применение закрученных потоков в задачах гидротехнического строительства — перспективное направление. В современных компоновках высоконапорных гидроузлов широко внедряются и эксплуатируются водосбросы с закрученными потоками (вихревые водосбросы). Тем не менее, многие аспекты динамики вихревых структур все еще остаются не до конца изученными. В этой ситуации особо важную роль играет физический эксперимент и методы численного моделирования. В данной статье авторы рассматривают вихревое течение вязкой несжимаемой жидкости в закрытом канале и в струе с использованием вурфа скоростей, связывающего между собой три компоненты скорости  $U$ ,  $V$  и  $W$ .

При рассмотрении течения данного типа применительно к схеме шахтных вихревых водосбросов, т.е. продольно-циркуляционные течения в закрытом канале, переходящее на выходе в безграничное пространство, затопленное той же

жидкостью, можно предположить, что параметры течения связаны между собой определенными функциональными соотношениями.

Для характеристики интенсивности закрутки выберем нормированные параметры:

— для закрытого канала — по радиусу выходного сечения  $R$  и средней продольной скорости на выходе  $V_0$ ;

— для струи — по половине радиуса  $R/2$  той же скорости в начальном сечении струи;

Примем гипотезу о том, что все изменения в течении, связанные с изменением граничных условий в начальном сечении, происходят на короткой длине  $l/d \leq 1,0-2,0$ .

Используя результаты исследований полученных в работах [1–4] будем рассматривать продольно-циркуляционное течение вязкой несжимаемой жидкости в закрытом канале и в струе с использованием вурфа скоростей, связывающего между собой три компоненты скорости  $U$ ,  $V$  и  $W$

$$W = - \frac{V(V+U)}{\left[ V + \frac{1}{(1-D)}U \right]}. \quad (1)$$

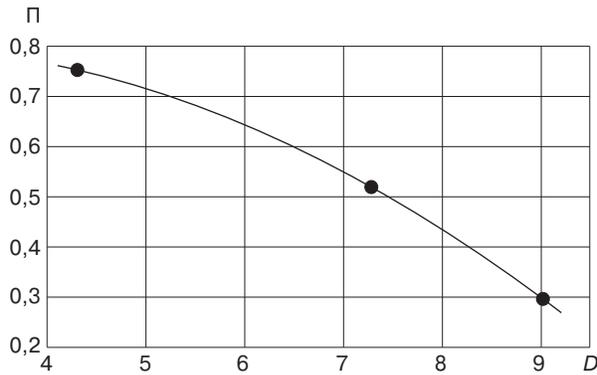
Вурф скоростей (1) также как дифференциальные уравнения движения содержит константу  $D$ , которую можно определить используя опытные данные, например единичные профили тангенциальной скорости, приведенные в работе [2], а также по зависимости  $\Pi = f(D)$  (рис. 1). Расчеты по определению этих величин для различных значений закрутки сведены в таблицу (табл. 1). Далее представлены расчеты для других условий и закруток (табл. 2). Сравнение полученного распределения тангенциальной скорости (по уравнениям вурфа скоростей) с базовыми данными, т.е. с единичными профилями скорости [2] (рис. 2) показывает их удовлетворительное согласование.

Таблица 1

**Распределение тангенциальной скорости при закрутках ( $\Pi = 0,3; 0,5; 0,8$ )**  
**[Distribution of tangential velocity at various twist degrees ( $P = 0,3; 0,5; 0,8$ )]**

$\bar{r}$	$W$	$U$		$V$	$V(V+U)$	$-\left[ V + \frac{1}{(1-D)}U \right]$	$W$
При $\Pi = 0,3, D = 8,3$ [At $P = 0,3, D = 8,3$ ]							
0,2	0,2	1,0		0,02	0,02	0,10	0,2
0,4	0,3	1,0		0,03	0,03	0,10	0,3
0,6	0,32	1,0		0,032	0,032	0,10	0,32
0,8	0,35	1,0		0,035	0,035	0,10	0,35
1,0	0,36	1,0		0,036	0,035	0,10	0,36
При $\Pi = 0,5, D = 7,2$							
0,2	0,50	1,0		0,05	0,052	0,11	0,47
0,4	0,78	1,0		0,078	0,084	0,11	0,76
0,6	0,76	1,0		0,076	0,082	0,11	0,75
0,8	0,66	1,0		0,066	0,070	0,11	0,63
1,0	0,59	1,0		0,055	0,062	0,11	0,56

$\bar{r}$	$W$	$U$		$V$	$V(V+U)$	$-\left[V + \frac{1}{(1-D)}U\right]$	$W$
При $\Pi = 0,8, D = 4,2$							
$r \leq 0,4$ область паровоздушного жгута [ $r \leq 0,4$ air-steam harness area]							
0,4	2,0	1,0		0,2	0,24	0,11	2,18
0,6	2,12	1,0		0,215	0,256	0,11	2,32
0,8	1,85	1,0		0,185	0,22	0,11	2,0
1,0	1,75	1,0		0,175	0,205	0,11	1,86



**Рис. 1.** Зависимость  $\Pi = f(D)$   
[Fig. 1.  $\Pi = f(D)$  relationship]

В рассматриваемом течении выходное сечение водовода, из которого поток выпускается в затопленное пространство в виде закрученной струи, — одновременно начальное сечение струи, т.е. служит связующим сечением при переходе от одних граничных условий (с твердыми границами) к условиям открытого потока.



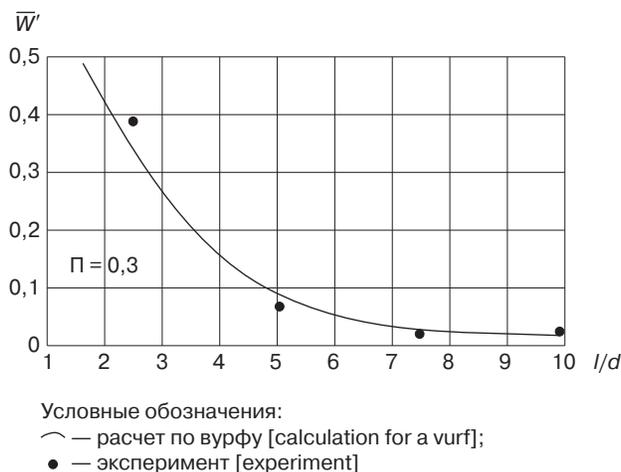
**Рис. 2.** Распределение безразмерной тангенциальной скорости в выходном сечении водовода  
[Fig. 2. Distribution of dimensionless tangential velocity in outlet section of conduit]

При анализе расчетных и экспериментальных данных было замечено, что константа  $D$  в произвольных точках данного сечения практически постоянна, а при переходе от одного сечения к другому — изменяется. Важной характеристикой в рассматриваемых течениях является связь параметра закрутки с константой  $D$ . Именно два эти параметра ответственны за формирование структур потока. Другая важная характеристика — изменение максимальной продольной  $U_{\max}$  и тангенциальной скорости  $W_{\max}$ .

Таблица 2

**Распределение тангенциальной скорости  $W'$  (по уравнениям вурфа скоростей) (рис. 3)**  
[Tangential velocity distribution  $W'$  (by wurf equations of velocities)]

$l/d$	$U_{\max}/U_0$	$W_{\max}/U_0 = \bar{W}_{\max}$	$V/U_0 = 0,1\bar{W}_{\max}$	$-V(V + U_{\max})$	$\left[ V + \frac{1}{(1-D)} \bar{U}_{\max} \right]$	$\bar{W}'$
2,5	0,6	0,32	0,032	0,032	0,0856	0,38
5,0	0,47	0,08	0,008	0,008	0,1176	0,07
7,5	0,38	0,052	0,0052	0,0052	0,1124	0,04
10,0	0,32	0,034	0,0034	0,0034	0,1122	0,004



**Рис. 3.** Сравнение распределения тангенциальной скорости (по уравнениям вурфа скоростей) с базовыми данными, т.е. с единичными профилями скорости

[Fig. 3. Comparison of tangential velocity distribution (according to wurf equations of velocities) with basic data, i.e. with unit velocity profiles]

Гидравлический расчет распределения скорости в закрытом канале удобно вести в такой последовательности:

- 1) устанавливаются исходные данные, определяемые известными способами:
  - средняя скорость  $U_0$  в отводящем водоводе;
  - параметр закрутки  $\Pi_0$  в сечении на выходе из водовода;
  - диаметр водовода;
- 2) по зависимости  $\Pi = f(D)$  определяется значение постоянной  $D$  (см. рис. 1);
- 3) находится распределение тангенциальной скорости для данных значений  $\Pi$  и  $D$  (см. табл. 1, 3);
- 4) проверяется достоверность полученного профиля тангенциальной скорости путем сопоставления его с опытными профилями скорости [1] (см. рис. 2).

**Определение константы  $D$  в начальном сечении струи**  
[Determination the  $D$  constants in the initial section of jet]

$l/d$	$U_{\max}/U_0$	$W_{\max}/U_0 = \bar{W}_{\max}$	$V/U_0 = 0,1\bar{W}_{\max}$	$\bar{U}_{\max}\bar{W}_{\max}$	$\bar{U}_{\max} + \bar{W}_{\max} + \bar{V}$	$D$
2,5	0,6	0,32	0,032	0,192	0,95	7,3
5,0	0,47	0,08	0,008	0,038	0,56	9,4
7,5	0,38	0,052	0,0052	0,197	0,48	8,89
10,0	0,32	0,034	0,0034	0,0108	0,35	10,07
20,0	0,17	0,011	0,0011	0,0017	0,18	6,5
Среднее значение константы принимаем $D = 9,5$ [The average value of the constant is $D = 9,5$ ]						

Гидравлический расчет течения в закрытом канале или в затопленной струе имеет свои особенности, поэтому их нужно рассчитывать отдельно. Указанные течения связаны общим сечением (сечением выхода из закрытого канала) одновременно являющимися начальным сечением затопленной струи.

Расчет затопленной струи удобно вести в такой последовательности.

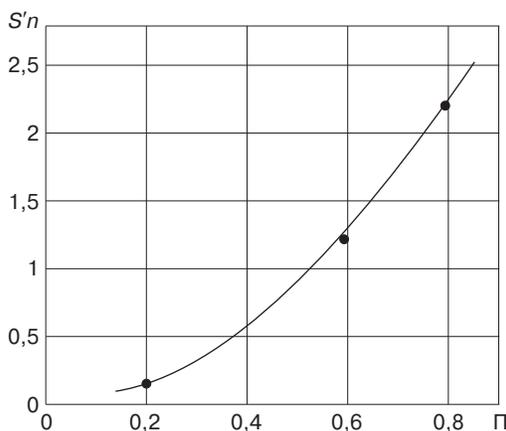
Устанавливаются исходные данные:

- средняя скорость  $U_0$  в отводящем водоводе;
- параметр закрутки  $\Pi_0$  в сечении струи. Для струи используется параметр закрутки, учитывающий отсутствие твердых границ течения. Таким служит параметр закрутки Хигера—Бэра в модифицированном виде  $S'_n$ , где линейные размеры нормированы по половине радиуса  $R/2$ , а не по радиусу  $R$ , как это принято для параметра Хигера—Бэра, т.е.

$$S'_n = 2 S_n. \quad (2)$$

С учетом этого интенсивность закрутки  $S'_n$  определяется по зависимости (рис. 4)

$$S'_n = f(\Pi). \quad (3)$$



**Рис. 4.** Зависимость  $S'_n = f(\Pi)$

[Fig. 4.  $S'_n = f(\Pi)$  relationship]

При одинаковой интенсивности закрутки передаваемой затопленной струе в начальном сечении значение  $S'_n$  в 2 раза больше, чем значение  $S_n$ . Таким образом, зависимость  $S'_n = f(\Pi)$  отражает условия течения для сечения выхода из закрытого канала через величину  $\Pi$ , относящуюся к закрытому каналу и величину  $S'_n$ , относящуюся к затопленной струе.

Течение в затопленной струе совсем иное, чем в закрытом канале и требует верификации, которое можно провести на основе опытных и расчетных данных. Такие данные для слабо закрученных струй приводятся в работе Л.Г. Лойцянского [5], что представляет интерес для авторского исследования, так как из вихревого водосброса также вытекает слабо закрученная струя с остаточной закруткой  $\Pi \leq 0,3-0,35$ .

Следует отметить, что такая интенсивность закрутки слабо влияет на меридиональные течения в струе [6] и поэтому результаты, полученные для одной произвольной закрутки в пределах области слабо закрученных струй, можно распространить на весь класс таких струй.

### Выводы

Благодаря использованию вурфа скоростей и канона пропорциональности, связывающего между собой три компонента скорости  $U$ ,  $V$  и  $W$  удалось получить явные аналитические решения в более простых формах — дифференциальных и интегрально-дифференциальных. Этот канон был выбран удовлетворяющим закону сохранения энергии, что позволило наложить ограничения на функцию  $\Psi = \Psi(x, r)$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Пономарев Н.К. К вопросу о закрученном движении вязкой жидкости в трубе // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 3. 2012. С. 30–38.
- [2] Животовский Б.А. Водосбросные и сопрягающие сооружения с закруткой потока. М.: Изд-во ИПК РУДН, 1995. С. 190.
- [3] Животовский Б.А., Пономарев Н.К. Сопряжение шахтных водосбросов с нижним бьефом в условиях высоких напоров // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. № 1. С. 1–13. Doi:10.15862/122TVN115. URL: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vo> (дата обращения: 16.10.2017).
- [4] Животовский Б.А., Пономарев Н.К. Совершенствование гидравлического расчета шахтного вихревого водосброса // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. № 1. С. 1–17. Doi:10.15862/121TVN115. URL: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vo> (дата обращения: 16.10.2017).
- [5] Лойцянский Л.Г. Распространение закрученной струи в безграничном пространстве, затопленном той же жидкостью // Прикладная математика и механика. АН СССР [ОТН]. 1953. Т. 17. С. 3–16.
- [6] Зуйков А.Л., Орехов Г.В., Волишаник В.В. Распределение азимутальных скоростей в ламинарном контрвихревом течении // Вестник МГСУ. 2013. С. 150–161

© Пономарев Н.К., Щесняк Л.Е., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: 28 октября 2017

Дата принятия к публикации: 10 января 2018

**Для цитирования:**

Пономарев Н.К., Шесняк Л.Е. К вопросу о гидравлическом расчете основных параметров продольно-циркуляционных течений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 59–66. DOI 10.22363/2312-8143-2017-19-1-59-66

**Сведения об авторах:**

Пономарев Николай Константинович — кандидат технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* гидравлика сооружений, речная гидравлика, проблемы использования водных ресурсов. *Контактная информация:* e-mail: ponomarev\_nk@rudn.university, rudneng@mail.ru

Шесняк Леонид Евгеньевич — аспирант департамента архитектуры и строительства инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* гидравлика, гидравлика сооружений, речная гидравлика. *Контактная информация:* e-mail: schesnyak\_le@rudn.university

## ON HYDRAULIC ANALYSIS OF THE MAIN PARAMETERS OF LONGITUDINAL-CIRCULATING FLOW

N.K. Ponomarev, L.E. Schesnyak

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

Recently in practice of engineering hydraulic structures spillways with a longitudinal-circulating flow are applied. The distinguished properties of longitudinal-circulating flows are a unique example of compatibility of flow type with technological purpose of a spillway structure. The hydraulic characteristics of flow (throughput capacity, velocity distribution, pressure distribution, cavitation analysis, etc.) are determined on the basis of the calculation methods developed in the above studies, namely for: longitudinal flow using the known standard calculation methods [1]; longitudinal-circulating flow interacting with solid boundaries of spillway [1–4]; longitudinal-circulating flow in the form of a swirling stream in the aquatic environment or in the air [2; 3]; the flow arising from the interaction of unidirectional longitudinal-circulating flows [4; 5]; the flow arising from the interaction of oppositely swirling coaxial flows [3]. In this paper, the authors consider the longitudinal-circulating flow of viscous incompressible fluid in a closed channel and in a jet using a velocity wurf linking the three components of velocity  $U$ ,  $V$  and  $W$ .

**Key words:** vortex shaft spillway, longitudinal-circulating flow, velocity wurf, tangential velocity, twist parameter

### REFERENCES

- [1] Ponomarev N.K. On the problem of twirled movement of viscous liquid in a pipe. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2012. № 3. 2012. P. 30–38. (In Russ.).
- [2] Zhivotovski B.A. *Vodosbrosnye i sopryagayushchie sooruzheniya s zakrutkoj potoka*. [Spillway and grade-control structures with flow twist]. Moscow: IPK RUDN publ., 1995. 190 p. (In Russ.).

- [3] Zhivotovski B.A., Ponomarev N.K. Conjugation of mine spillway lower pool under conditions of high pressures. *Naukovedenie*. 2015. 7(1). 1–13. (In Russ.). Doi: 10.15862/122TVN115. Available from: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vo> (Accessed 16.10.2017). (In Russ.).
- [4] Zhivotovski B.A., Ponomarev N.K. Improvement of hydraulic calculation of mine vortical spillway. *Naukovedenie*. 2015. 7(1). 1–17. (In Russ.). Doi: 10.15862/121TVN115. Available from: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vo> (Accessed: 16.10.2017). (In Russ.).
- [5] Lojcyanskij L.G. Rasprostranenie zakruchennoj strui v bezgranichnom prostranstve, zatoplennom toj zhe zhidkost'yu [Swirling stream propagation in unbounded space flooded with the same fluid]. *Prikladnaya Matematika i Mekhanika AN SSSR [OTN]*. 1953. No. 17. P. 3–16. (In Russ.).

**Article history:**

Received: October 28, 2017

Accepted: January 10, 2018

**For citation:**

Ponomarev N.K., Schesnyak L.E. (2018). On hydraulic analysis of the main parameters of longitudinal-circulating flow. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(1), 59–66. DOI 10.22363/2312-8143-2017-19-1-59-66

**About the authors:**

*Nikolaj K. Ponomarev* — Candidate of Technical Science, Professor of Department of Architecture and Civil Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Scientific interests*: Hydraulics of structures, river hydraulics, problems of water resources. *Contact information*: e-mail: [ponomarev\\_nk@rudn.university](mailto:ponomarev_nk@rudn.university)

*Leonid E. Schesnyak* — PhD student of Department of Architecture and Civil Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Scientific interests*: Hydraulics of structures, river hydraulics. *Contact information*: e-mail: [schesnyak\\_le@rudn.university](mailto:schesnyak_le@rudn.university)



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-67-79

УДК 519.6

## ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ЕЕ РЕШЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫМ АЛГОРИТМОМ «СЕРОГО ВОЛКА»

А.И. Дивеев<sup>1,2</sup>, С.В. Константинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление» Российской академии наук  
Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, 44

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов  
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Работа посвящена численному методу для решения задачи оптимального управления. Основным подходом к численному решению задачи оптимального управления является редукция задачи оптимального управления к задаче нелинейного программирования и ее решение классическими градиентными методами оптимизации. Для данной цели задачу оптимального управления, как задачу поиска функции времени, заменяют поиском значений управления в дискретные моменты времени. Увеличение количества точек дискретизации, увеличивает точность аппроксимации функции, но и увеличивает размерность пространства поиска в задаче нелинейного программирования. В сложных задачах нелинейного программирования при неизвестной топологии целевой функции утверждение, что использование классических градиентных методов обеспечивает нахождение решения, — не оправдано. Часто задача оптимального управления в результате дискретизации и других особенностей преобразуется в задачу нелинейного программирования с не унимодальной целевой функцией, для которой не применимы градиентные методы. В работе предложено решать задачу оптимального управления эволюционными алгоритмами, которые не используют вычисление градиента и способны находить решение задач с не унимодальной целевой функцией. В работе представлен современный эволюционный алгоритм «серого волка». Рассмотрена прикладная задача оптимального разворота самолета. В задаче математическая модель объекта управления описана системой из семи обыкновенных дифференциальных уравнений и заданы ограничения на величину и скорость изменения управления. Экспериментально показано, что эволюционный алгоритм «серого волка» успешно решает данную задачу оптимального управления.

**Ключевые слова:** эволюционный алгоритм, оптимальное управление, алгоритм «серого волка»

Основной подход к численному решению задачи оптимального управления заключается в ее преобразовании в задачу нелинейного программирования, которое состоит в дискретизации компонент вектора управления по времени [1]. При таком подходе точность численного решения задачи оптимального управления пропорциональна числу точек дискретизации, но одновременно с точностью растет и размерность пространства искомых параметров. В полученной после преобразования задаче вычисление целевой функции требует интегрирования системы дифференциальных уравнений. Для задач с высокой степенью пространства требуемых параметров, вычисление целевой функции будет занимать большую

часть от всего времени вычислений. Из этого следует, что сложность алгоритмов в задачах оптимального управления более правильно оценивать по числу вычислений целевой функции, а не по числу поисковых итераций.

Еще одна важная особенность задачи оптимального управления состоит в отсутствии сведений о топологических свойствах целевой функции в пространстве искомых параметров. Для случаев, когда целевая функция содержит большое количество локальных экстремумов, велика вероятность, что методы нелинейного программирования будут находить локальные экстремумы, значение которых не дает информации о месте расположения глобального оптимума в пространстве искомых параметров. Таким образом, градиентные методы, т.е. методы, требующие вычисления первой производной, которые наиболее часто применялись на практике для решения задач оптимального управления, могут застревать в локальных экстремумах и тем самым работать неэффективно.

Первые эволюционные алгоритмы появились в конце XX века [2]. Их также называют популяционными, роевыми или алгоритмами, вдохновленными природой. В настоящее время класс эволюционных алгоритмов насчитывает более 150 методов. Новые уникальные методы, а также множество гибридных методов пополняют данный класс до сих пор. Многие методы из класса эволюционных алгоритмов имеют экзотические имена, которые удобны для использования, но лишь косвенно могут показать используемые в методе математические подходы. Авторы используют термин «эволюционные алгоритмы» для тех методов, которые имеют следующие две общие черты: а) для вычислений используется начальное множество возможных решений, которое генерируется случайным образом; б) на последующих вычислительных этапах модификация или «эволюция» этого множества выполняется в соответствии с информацией о ранее вычисленных значениях целевой функции для элементов множества возможных решений.

Современные методы, относящиеся к классу эволюционных алгоритмов, могут применяться с любыми типами функций, в том числе и с функциями с множеством локальных экстремумов. В работах [3; 4] показана эффективность эволюционных алгоритмов для решения задач оптимального управления и их преимущество над классическими градиентными методами. Однако присутствие стохастической составляющей в модификации множества возможных решений все еще вызывает недоверие у некоторых ученых.

Целью данной работы является изучение эффективности применения современного алгоритма «серого волка» для решения задач оптимального управления на примере задачи оптимального управления самолетом при совершении боевого разворота.

### **Задача оптимального управления**

Задача оптимального управления в наиболее часто используемой для численных решений постановке:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}),$$

где  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$  — вектор состояния;  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_m]^T$  — вектор управления,  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = [f_1(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \dots, f_n(\mathbf{x}, \mathbf{u})]^T$ .

## Ограничения на управление

$$\mathbf{u}^- \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^+,$$

где  $\mathbf{u}^-$ ,  $\mathbf{u}^+$  — заданные постоянные векторы ограничений;  $\mathbf{u}^- = [u_1^-, \dots, u_m^-]^T$ ,  $\mathbf{u}^+ = [u_1^+, \dots, u_m^+]^T$ .

## Начальные условия

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0,$$

где  $\mathbf{x}^0$  — заданный вектор начальных значений,  $\mathbf{x}^0 = [x_1^0, \dots, x_n^0]^T$ .

## Терминальные условия

$$\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}^f,$$

где  $\mathbf{x}^f$  — заданный вектор терминального состояния,  $\mathbf{x}^f = [x_1^f, \dots, x_n^f]^T$ ;  $t_f$  — ограниченное время процесса управления

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^f\| \leq \varepsilon, \\ t^+ & \text{— иначе} \end{cases},$$

где  $t^+$ ,  $\varepsilon$  — заданные положительные величины, норма разности векторов может выбираться из особенностей задачи, для модели объекта с соизмеримыми компонентами вектора состояния целесообразно выбрать Евклидову норму

$$\|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^f\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i(t) - x_i^f)^2}.$$

## Функционал качества

$$J = \|\mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}^f\| + \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt \rightarrow \min.$$

Результатом решения задачи оптимального управления является вектор управления с компонентами в форме функций времени  $\tilde{\mathbf{u}}(\cdot) = [\tilde{u}_1(\cdot), \dots, \tilde{u}_m(\cdot)]^T$ , поэтому данная задача относится к классу задач бесконечномерной оптимизации. Для применения к решению задачи оптимального управления методов нелинейного программирования необходимо аппроксимировать искомые функции  $\tilde{u}_i(\cdot)$ ,  $i = 1, \dots, m$  функциональными зависимостями от конечного числа параметров. Для этой цели часто используют полиномы, ортогональные ряды или кусочно-функциональную аппроксимацию.

Приведем редукцию задачи оптимального управления к задаче нелинейного программирования с помощью кусочно-линейной аппроксимации.

Зададим малый интервал  $\Delta t > 0$ , и определим количество интервалов

$$M = \left\lfloor \frac{t^+}{\Delta t} \right\rfloor.$$

Значение управления  $\tilde{\mathbf{u}}(t) = [\tilde{u}_1(t), \dots, \tilde{u}_m(t)]^T$  в момент времени  $t$  определяем из соотношения

$$\tilde{u}_j(t) = \begin{cases} u_j^-, & \text{если } q(t, j, i, \Delta t) < u_j^- \\ u_j^+, & \text{если } q(t, j, i, \Delta t) > u_j^+, \\ q(t, j, i, \Delta t) & \text{— иначе} \end{cases}$$

где  $i\Delta t \leq t < (i+1)\Delta t$ ;  $q(t, j, i, \Delta t) = q_{(j-1)M+i} + (q_{(j-1)M+i+1} - q_{(j-1)M+i}) \frac{(t - (i-1)\Delta t)}{\Delta t}$ ;  
 $i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, m$ .

В результате поиск управления в задаче оптимального управления заменяем поиском вектора постоянных параметров

$$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_p]^T,$$

где  $p = m(M+1)$ .

При поиске значения параметров ограничиваем

$$q_i^- \leq q_i \leq q_i^+, \quad i = 1, \dots, p,$$

где  $q_i^-, q_i^+$  — заданные значения ограничений на параметры;  $q_i^- \leq u_{\lfloor i/(M+1) \rfloor + 1}^-$ ,  $u_{\lfloor i/(M+1) \rfloor + 1}^+ \leq q_i^+$ ,  $i = 1, \dots, p$ ,  $\lfloor A \rfloor$  — целая часть числа  $A$ .

### Алгоритм «серого волка»

Алгоритм «серого волка» был предложен в 2013 году [5]. По словам авторов, их алгоритм имитирует иерархию лидерства и механизмы охоты серого волка в дикой природе. Для моделирования иерархии лидерства используются четыре типа серых волков: альфа, бета, гамма и омега. Математическое моделирование иерархии лидерства серых волков предполагает, что альфа — это лучшее известное на текущий момент решение целевой функции. Бета и гамма — соответственно второе и третье по качеству решения целевой функции. Остальные решения из множества возможных решений, называемые омега, эволюционируют по определенным правилам на основе своего текущего значения и текущих значений альфа, бета и гамма.

Сравнительный анализ алгоритма, проведенный авторами метода, показал, что алгоритм «серого волка» может составить конкуренцию многим хорошо известным и зарекомендовавшим себя эволюционным алгоритмам.

Отличительная особенность алгоритма «серого волка» среди множества других методов из класса эволюционных алгоритмов заключается в отсутствии свободных параметров, требующих настройки под определенную задачу. Для вычислений по этому методу требуется указать только размер множества возможных решений и максимальное число вычислительных итераций.

При рассмотрении алгоритма «серого волка» генерируем множество начальных возможных решений:

$$Q = (\mathbf{q}^1, \dots, \mathbf{q}^H),$$

где  $\mathbf{q}^i = [q_0^i, \dots, q_{2M-1}^i]^T$ ,  $i = 1, \dots, H$ ,  $H$  — размер множества возможных решений;

$$q_j^i = \xi(q_j^+ - q_j^-) + q_j^-, j = 0, \dots, p - 1,$$

$\xi$  — случайное число,  $\xi \in [0; 1]$ .

Вычисляем значение целевой функции для каждого возможного решения

$$\mathbf{F} = (f_1 = J(\mathbf{q}^1), \dots, f_H = J(\mathbf{q}^H)).$$

Задаем текущее значение счетчика итераций  $w = 0$ , максимальное число итераций  $W$  и начинаем вычислительные итерации.

В текущем множестве возможных решений  $Q$  выбираем три наилучших решения  $\mathbf{q}^\alpha$ ,  $\mathbf{q}^\beta$ ,  $\mathbf{q}^\delta$ :

$$J(\mathbf{q}^\alpha) = \min_i \{J(\mathbf{q}^i) : i = 1, \dots, H\}, \quad (1)$$

$$J(\mathbf{q}^\beta) = \min_i \{J(\mathbf{q}^i) : \forall i \in \{1, \dots, H\} \setminus \{\alpha\}\}, \quad (2)$$

$$J(\mathbf{q}^\delta) = \min_i \{J(\mathbf{q}^i) : \forall i \in \{1, \dots, H\} \setminus \{\alpha, \beta\}\}. \quad (3)$$

Вычисляем значение параметра линеаризации

$$a = 2 - \frac{2w}{W}, \quad (4)$$

где  $w = 0, \dots, W - 1$ .

Для каждого возможного решения  $\mathbf{q}^i$ ,  $i = 1, \dots, H$  в текущем множестве  $Q$  производим вычисления альфа, бета и гамма составляющих, а затем производим модификацию возможного решения  $\mathbf{q}^i$ .

Вычисляем значение составляющей альфа

$$\alpha_j = q_j^\alpha - d_j^\alpha g_j^\alpha q_j^\alpha - q_j^i, j = 0, \dots, p - 1, \quad (5)$$

где  $g_j^\alpha = 2a\xi - a$ ,  $d_j^\alpha = 2\xi$ ,  $\xi$  — случайное число,  $\xi \in [0; 1]$ .

Вычисляем значение составляющей бета

$$\beta_j = q_j^\beta - d_j^\beta |g_j^\beta q_j^\beta - q_j^i|, j = 0, \dots, p - 1, \quad (6)$$

где  $g_j^\beta = 2a\xi - a$ ,  $d_j^\beta = 2\xi$ ,  $\xi$  — случайное число,  $\xi \in [0; 1]$ .

Вычисляем значение составляющей гамма

$$\gamma_j = q_j^\gamma - d_j^\gamma |g_j^\gamma q_j^\gamma - q_j^i|, j = 0, \dots, p - 1, \quad (7)$$

где  $g_j^\gamma = 2a\xi - a$ ,  $d_j^\gamma = 2\xi$ ,  $\xi$  — случайное число,  $\xi \in [0; 1]$ .

Вычисляем новое значение возможного решения  $q^i$

$$q_j^i = \begin{cases} q_j^-, & \text{если } (\alpha_j + \beta_j + \gamma_j) / 3 < q_j^- \\ q_j^+, & \text{если } (\alpha_j + \beta_j + \gamma_j) / 3 > q_j^+, \\ (\alpha_j + \beta_j + \gamma_j) / 3 & \text{— иначе} \end{cases}, \quad (8)$$

$i = 1, \dots, H, j = 0, \dots, p - 1$ .

Увеличиваем значение счетчика итераций и повторяем вычисления (1–8) до достижения максимального числа итераций.

### **Задача оптимального управления самолетом при выполнении боевого разворота**

Боевой разворот — авиационный термин, которым принято обозначать вид маневрирования самолета, при котором он совершает быстрый разворот на  $180^\circ$  с одновременным набором высоты. При рассмотрении задачи оптимального управления самолетом в режиме боевого разворота критерием оптимальности служит выход самолета на заданную высоту и траекторию за минимальное время.

Приведем описание математической модели, описывающей движение самолета [6]:

$$\dot{x} = V \cos \theta \cos \psi;$$

$$\dot{y} = V \sin \theta;$$

$$\dot{z} = -V \cos \theta \sin \psi;$$

$$\dot{V} = \frac{g}{G} (u_1 P \cos \alpha - C_x q S - G \sin \theta);$$

$$\dot{G} = -C_S;$$

$$\dot{\theta} = g(u_2 N \cos u_4 - \cos \theta) / V;$$

$$\dot{\psi} = -\frac{g u_2 N \sin u_4}{V \cos \theta}.$$

Параметры имеют следующие значения:  $g = 9,81$ ;  $S = 55$ ;

$$q = \rho(y)V^2/2;$$

$$\rho(y) = 3,3 \cdot 10^{-10}y^2 - 1,155 \cdot 10^{-5}y + 0,125;$$

$$P = (10 + V^2/a^2(y))(25\,000 - y)/12,5;$$

$$a(y) = 340,3 - 4,08 \cdot 10^{-3}y;$$

$$\alpha(u_1, u_2) = \frac{u_2 NG}{u_1 P + 4,6qS};$$

$$C_S = (0,7 + 2(u_1 - 0,3)^2)u_1 P/3600;$$

$$N = \min \left\{ \frac{qS}{G}, \frac{150\,000}{g}, 8 \right\};$$

$$C_x = 0,02 + 3,174\alpha^2 + 0,03u_3.$$

Начальные значения фазовых координат и управлений:  $x = 0$ ,  $y = 5000$ ,  $z = 0$ ,  $V = 300$ ,  $\psi = 0$ ,  $\theta = 0$ ,  $G = 20\,000$ ,  $u_1 = 0$ ,  $u_2 = 1/N$ ,  $u_3 = 0$ ,  $u_4 = 0$ .

Целевые значения фазовых координат:  $y^f = 7000$ ,  $\psi^f = -\pi$ ,  $\theta^f = 0$ ,  $u_2^f = 1/N$ ,  $u_4^f = 0$ .

На управления наложены следующие ограничения:

$$0,05 \leq u_1 \leq 1, 0,01 \leq u_2 \leq 1, 0 \leq u_3 \leq 1,$$

$$|\dot{u}_1| \leq 0,2, |\dot{u}_2| \leq 0,25, |\dot{u}_3| \leq 1, |\dot{u}_4| \leq 1,57.$$

Необходимо найти управления  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$ ,  $u_4(t)$  обеспечивающие перемещение самолета из начальной точки в целевую точку, заданную условиями, за кратчайшее время.

### Вычислительный эксперимент

Для проведения вычислительного эксперимента по поиску оптимального управления самолетом при совершении боевого разворота использовались следующие данные:

Значение целевой функции вычислялось по формуле

$$J = t_f + P(t_f) \rightarrow \min,$$

$$\text{где } t_f = \begin{cases} t, & \text{если } P(t) \leq \varepsilon \\ t^+ & \text{— иначе} \end{cases}.$$

Значение штрафа  $P(t)$  вычислялось по формуле

$$P(t) = \left\{ [0,001(y(t) - y^f)]^2 + (\psi(t) - \psi^f)^2 + (\theta(t) - \theta^f)^2 + (u_2(t) - u_2^f)^2 + (u_4(t) - u_4^f)^2 \right\}^{1/2}.$$

Параметры модели имели следующие значения:  $t^+ = 17,5$ ,  $\varepsilon = 0,01$ ,  $\Delta t = 0,25$ ,  $M = \lfloor 17,5/0,25 \rfloor = 70$ ,  $p = 4(M + 1) = 284$ ,  $\mathbf{q}^- = [-0,5 \ -0,5 \ -0,5 \ -\pi]^T$ ,  $\mathbf{q}^+ = [2 \ 2 \ 2 \ \pi]^T$ .

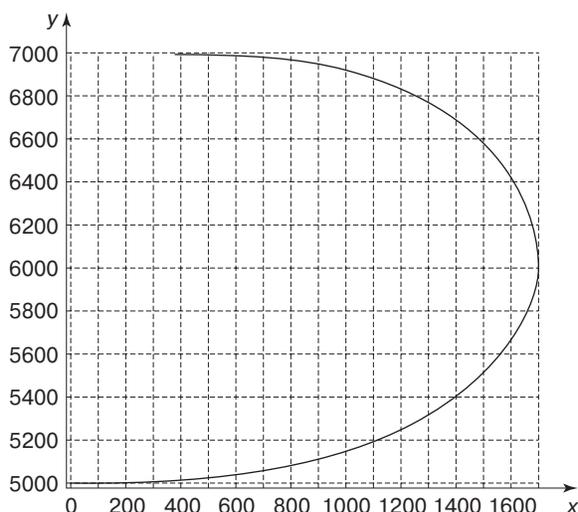
Требовалось найти управление в виде:

$$\tilde{u}_k(t) = \begin{cases} u_k^-, & \text{если } q_{i+Mk} + (q_{i+M(k-1)+1} - q_{i+M(k-1)}) \left( \frac{t}{\Delta t} - i + 1 \right) < u_k^- \\ u_k^+, & \text{если } q_{i+M(k-1)} + (q_{i+M(k-1)+1} - q_{i+M(k-1)}) \left( \frac{t}{\Delta t} - i + 1 \right) > u_k^+, \\ q_{i+M(k-1)} + (q_{i+M(k-1)+1} - q_{i+M(k-1)}) \left( \frac{t}{\Delta t} - i + 1 \right) - & \text{иначе} \end{cases}$$

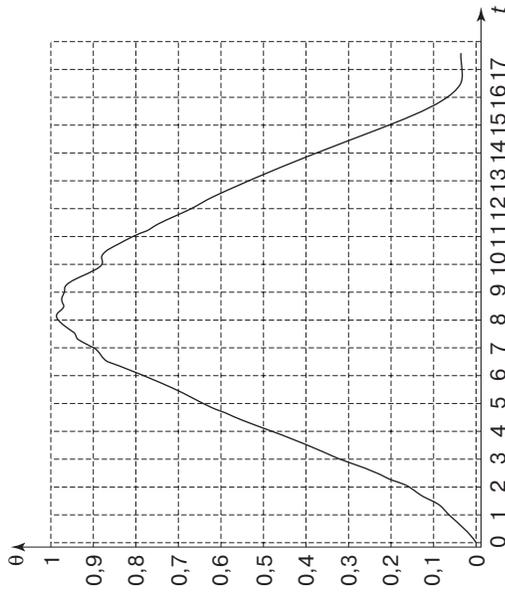
где  $i\Delta t \leq t < (i + 1)\Delta t$ ,  $i = 1, \dots, M$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$ .

Решением задачи оптимального управления будет вектор параметров  $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_p]^T$ . Поиск вектора оптимальных параметров осуществлялся с помощью алгоритма «серого волка». Размер множества возможных решений в алгоритме «серого волка» составлял  $H = 32$ , максимальное число итераций  $W = 4096$ .

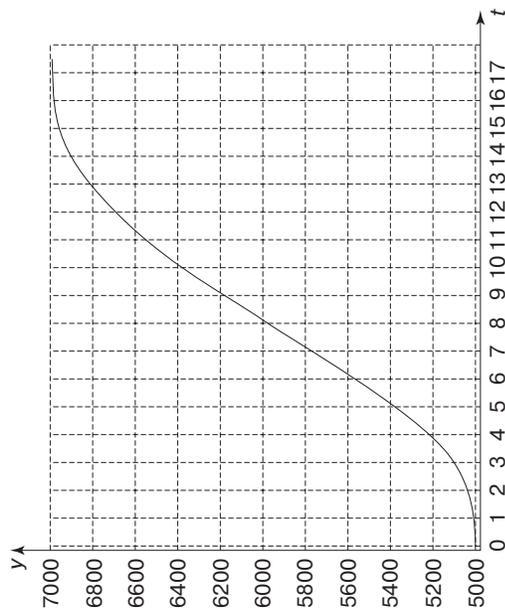
В результате вычислений было получено значение целевой функции  $J = 0,0434$ . Результаты моделирования с полученными в ходе вычислений результатами проиллюстрированы (на рис. 1 показана траектория движения самолета, рис. 2 — изменение высоты полета во времени, рис. 3 — изменение угла наклона самолета во времени, рис. 4 — изменение направления движения самолета, рис. 5 — изображены графики изменения управлений во времени).



**Рис. 1.** Оптимальная траектория движения самолета  
**[Fig. 1.** Optimal trajectory of the aircraft]



**Рис. 3.** Изменение угла наклона самолета во времени  
[Fig. 3. The angle of inclination of the aircraft]



**Рис. 2.** Изменение высоты полета во времени  
[Fig. 2. Aircraft altitude change]

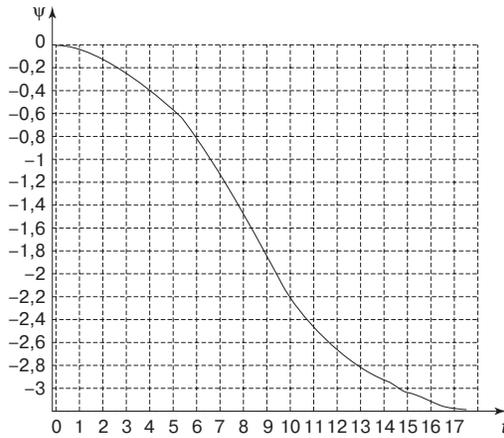


Рис. 4. Изменение направления движения самолета  
[Fig. 4. Aircraft direction]

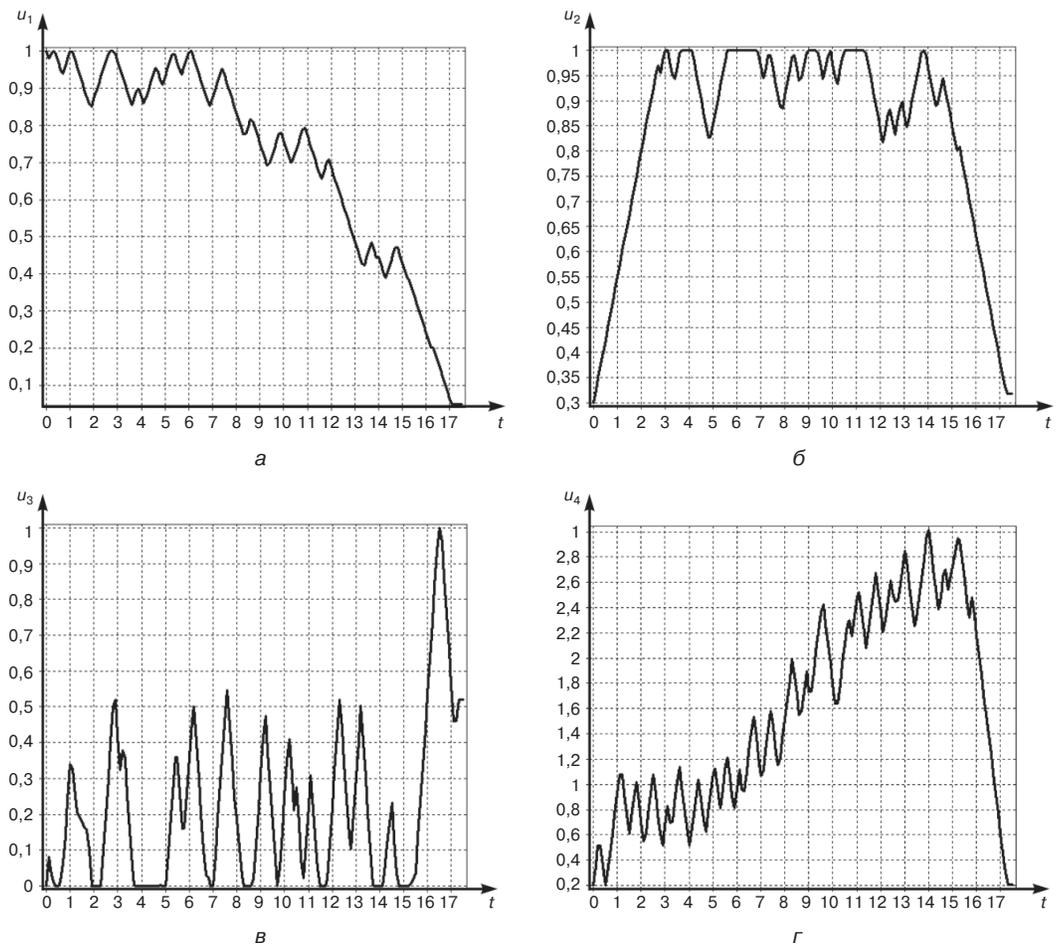


Рис. 5. Графики оптимального управления:  
а — управление  $u_1$ ; б — управление  $u_2$ ; в — управление  $u_3$ ; г — управление  $u_4$   
[Fig. 5. Graphs of optimal control: a — optimal control  $u_1$ ; б — optimal control  $u_2$ ;  
с — optimal control  $u_3$ ; д — optimal control  $u_4$ ]

## Выводы

Основными сложностями при численном решении задач оптимального управления, редуцированных в задачу нелинейного программирования, являются неопределенность топологических свойств целевой функции в пространстве искомых параметров и большая размерность пространства поиска.

Полученные в вычислительном эксперименте решение задачи оптимального управления боевым разворотом самолета результаты показали, что современный эволюционный алгоритм «серого волка» эффективно использовать для решения сложных задач оптимального управления.

### Финансирование:

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01203-а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Евтушенко Ю.Г.* Оптимизация и быстрое автоматическое дифференцирование. М.: ВЦ РАН, 2013. 144 с.
- [2] *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 446 с.
- [3] *Дивеев А.И., Константинов С.В.* Эволюционные алгоритмы для решения задачи оптимального управления // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 2. С. 254—265.
- [4] *Дивеев А.И., Константинов С.В.* Исследование эволюционных алгоритмов для решения задачи оптимального управления // Тр. МФТИ. 2017. Т. 9. № 3. С. 76—85.
- [5] *Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A.* Grey Wolf Optimizer / In *Advances in Engineering Software*. 2014. Vol. 69. P. 46-61. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [6] *Грачев Н.И., Евтушенко Ю.Г.* Библиотека программ для решения задач оптимального управления // Журнал Вычислительной математики и математической физики. 1979. Т. 19. № 2. С. 367—387.

© Дивеев А.И., Константинов С.В., 2017

### История статьи:

Дата поступления в редакцию: 26 декабря 2017

Дата принятия к печати: 15 января 2018

### Для цитирования:

*Дивеев А.И., Константинов С.В.* Задача оптимального управления и ее решение эволюционным алгоритмом серого волка // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 67—79. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-67-79

### Сведения об авторах:

*Дивеев Асхат Ибрагимович* — доктор технических наук, профессор, заведующий сектором проблем кибернетики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, профессор департамента механики и мехатроники инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* вычислительные методы для решения задач управления. *Контактная информация:* e-mail: aidiveev@mail.ru

Константинов Сергей Валерьевич — старший преподаватель департамента механики и мехатроники инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* методы оптимизации, эволюционные алгоритмы, генетические алгоритмы, вычислительные методы решения задач оптимального управления. *Контактная информация:* e-mail: konstantinov\_sv@rudn.university

## OPTIMAL CONTROL PROBLEM AND ITS SOLUTION BY GREY WOLF OPTIMIZER ALGORITHM

A.I. Diveev<sup>1,2</sup>, S.V. Konstantinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institution of Russian Academy of Sciences, Dorodnicyn Computing Centre of RAS,  
40, Vavilova str., Moscow, 119333, Russian Federation

<sup>2</sup> Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

The paper is devoted to a numerical method for solving the optimal control problem. The main approach to the numerical solution of the optimal control problem is the reduction of the optimal control problem to the problem of nonlinear programming and its following solution by classical gradient optimization methods. For this purpose, optimal control problem, which is a problem of searching time-dependent function, is replaced by the problem of searching of control values at discrete instants of time. An increase in the number of sampling points increases the accuracy of function approximation, but at the same time increases the dimensionality of the search space in the non-linear programming problem. In complex problems of non-linear programming with an unknown topology of the objective function, the statement that using classical gradient methods ensures finding a solution is not justified. The optimal control problem after the discretization and other modifications is often transformed to a non-linear programming problem with a non-unimodal objective function for which gradient methods are not applicable. In this paper we propose to solve the optimal control problem by evolutionary algorithms that do not use gradients and are able to find solutions of problems with non-unimodal objective function. The paper presents the modern evolutionary algorithm Grey wolf optimizer. The problem of the optimal combat turn of the aircraft is considered. In this problem the mathematical model of the control object is described by a system of seven ordinary differential equations. Also constraints on the value and rate of change of control are given. It is experimentally shown that the evolutionary algorithm Grey wolf optimizer successfully solves this optimal control problem.

**Key words:** optimal control problem, evolutionary algorithms, grey wolf optimizer

### REFERENCES

- [1] Evtushenko Yu.G. Optimizaciya i bystroe avtomaticheskoe differencirovaniye [Optimization and fast automatic differentiation]. Moscow: Dorodnicyn Computing Centre of RAS, 2013. (In Russ.).
- [2] Karpenko A.P. Sovremennyye algoritmy poiskovoi optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennyye prirodoy [Modern algorithms of search optimization. Nature-inspired algorithms]. Moscow: Bauman Press, 2014. (In Russ.).
- [3] Diveev A.I., Konstantinov S.V. Evolutionary algorithms for the problem of optimal control. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017. Vol. 18. No. 2. Pp. 254–265. (in Russ.)
- [4] Diveev A.I., Konstantinov S.V. Study of evolutionary algorithms for the optimal control problem. *Proceedings of MIPT*. 2017. Vol. 9. No. 3. Pp. 76–85. (in Russ.)

- [5] Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. Grey Wolf Optimizer / *In Advances in Engineering Software*, 2014. Vol 69, Pp. 46–61. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [6] Grachev N.I., Evtushenko Yu.G. A library of programs for solving optimal control problems, *U.S.S.R. Comput. Maths. Math. Phys.* 1979. Vol. 19. No. 2. Pp. 367–387. (In Russ).

**Article history:**

Received: December 26, 2017

Accepted: January 15, 2018

**For citation:**

Diveev, A.I., Konstantinov, S.V. (2018). Optimal control problem and its solution by grey wolf optimizer algorithm. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(1), 67–79. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-67-79

**Bio Note:**

*Askhat I. Diveev* — Doctor of Technical Sciences, professor, head of sector of Cybernetic problems, Federal Research Centre “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, professor at Department of Mechanics and Mechatronics, Engineering Academy, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests:* Computational methods for problems of control. *Contact information:* e-mail: aidiveev@mail.ru

*Sergey V. Konstantinov* — senior lecturer at Department of Mechanics and Mechatronics, Engineering Academy, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests:* Optimization algorithms, evolutionary algorithms, genetic algorithms, computational methods for problems of optimal control. *Contact information:* e-mail: konstantinov\_sv@rudn.university



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-80-91

УДК 504.55.054:622(470.6)

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

В.И. Голик<sup>1</sup>, Ю.И. Разоренов<sup>2</sup>, В.И. Ляшенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет)

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН  
*Российская Федерация, 362021, Владикавказ, ул. Николаева, 44*

<sup>2</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
им. М.И. Платова

*Российская Федерация, 346428, Ростовская обл., Новочеркасск, ул. Просвещения, 132*

<sup>3</sup> Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский  
институт промышленной технологии

*Украина, 52204, Днепропетровская обл., Желтые Воды, Бульвар Свободы, 3*

Актуальность работы объясняется возможностью вовлечения в отработку запасов, представленных бедными рудами, чему препятствует недостаточная изученность процесса выщелачивания. Подготовка руд производится без учета всех свойств полезного ископаемого и режима движения растворов, что удорожает горные работы, увеличивает потери полезных компонентов и ухудшает технико-экономические показатели. Целью работы является систематизация теории и практики использования технологий с выщелачиванием с оптимизацией по критерию полноты использования недр, накопленные в ураново-добывающей отрасли СССР. Сформулировано принципиальное отличие технологии выщелачивания металлов из руд как изменение фазового состояния металла непосредственно на месте залегания руд. Описаны особенности проектирования расположения и использования подготовительных и нарезных выработок из условия их повторного использования в процессе, дробления по условию обеспечения проникновения раствора реагента вглубь рудного куска, орошения как определяющего экономическую целесообразность применения технологии процесса, сбора растворов и предупреждения утечек для промышленной санитарии и жизнедеятельности. Обозначены особенности интенсификации процесса выщелачивания буровзрывным способом посредством деформирования массива выщелачиваемых руд работой взрывных газов и волны. Описана практика контроля полноты выщелачивания путем проходки выработок по выщелачиваемой руде. Отмечено, что подземное выщелачивание может занять приоритетные позиции при добыче полезных ископаемых, поэтому разработка научных основ его осуществления является одной из важнейших задач горнодобывающего производства, от решения которой зависит создание высокопроизводительных и безотходных схем извлечения полезных ископаемых из недр.

**Ключевые слова:** выщелачивание, руда, систематизация, недр, металл, проектирование, дробление, реагент, орошение, интенсификация, традиционная технология, запасы

### Введение

В экономике стран с развитой горнодобывающей отраслью отчетливо прослеживается тенденция исчерпания запасов сравнительно легкодоступных ме-

сторождений. Освоение же новых регионов добычи сопряжено с затратами, размер которых доступен не всем предпринимателям и странам [1–3].

Возможности сохранения показателей добычи металлов на необходимом уровне предоставляет использование отходов горного и обогащительного производства и добыча бедных и забалансовых руд с использованием новых технологий. Примером тому служит практика золотодобычи, где эффективно вовлекаются в разработку руды с содержанием 0,6–1,2 г/т, а также отходы горного и обогащительного производства с содержанием 0,3–0,6 г/т методами выщелачивания.

Переработка некондиционных ингредиентов горно-обогащительных производств не только увеличивает добычу металлов, но и оказывает комплексное влияние на состояние окружающей среды в регионе, что может создавать положительный эффект даже при убыточном производстве.

Возможность вовлечения в отработку месторождений полезных ископаемых, представленных бедными рудами, разработка которых в настоящее время традиционными технологиями нерентабельна, позволяет значительно расширить сырьевую базу промышленности.

Несмотря на имеющийся опыт и обилие работ в области выщелачивания, недостаточная изученность процесса препятствует широкому внедрению нового метода. Подготовка руд и собственно выщелачивание производится без учета всех свойств полезного ископаемого и режима движения растворов, что удорожает горные работы, увеличивает потери полезных компонентов и ухудшает технико-экономические показатели.

Целью работ, направленных на реализацию технологий с выщелачиванием, является систематизация теории и практики использования технологий с выщелачиванием с оптимизацией по критерию полноты использования недр.

Раньше другими вопросами подземного выщелачивания начали заниматься предприятия ураново-добывающей отрасли, наработки которой могут найти применение в других добывающих отраслях России и Зарубежья [4–6].

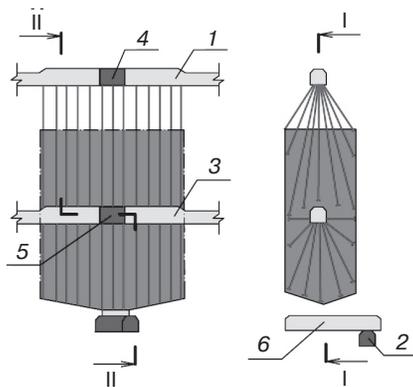
## **Результаты**

Системой разработки месторождения методом подземного выщелачивания называется совокупность горных выработок и порядок их проведения и эксплуатации, увязанный во времени и пространстве с переводом полезного компонента в раствор или определенный во времени и пространстве порядок формирования рабочей зоны в целях перевода полезного компонента в жидкую фазу для последующего извлечения из раствора.

Принципиальное отличие технологии состоит в изменении фазового состояния металла непосредственно на месте залегания руд.

На поверхность выдается лишь небольшая часть руды, поэтому появляется возможность снизить сечение подготовительных выработок и применить транспортные средства меньших размеров. С другой стороны, развитие технических средств происходит на базе совершенствования самоходного оборудования, которое требует увеличения размеров горных выработок, что может быть сопряжено при комбинировании схем подготовки с совмещением функций выработок.

Особенность проектирования подготовительных выработок заключается в использовании этажных и подэтажных штреков сначала для орошения, а затем для сбора продукционных растворов. Оно характерно и для использования скважин сначала для отбойки и дробления руд, а затем для подачи и сбора растворов. Схема совмещения функций скважин представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Подготовка блока к выщелачиванию с совмещением функций выработок:

1 — оросительно-буровой штрек; 2 — нижний этажный штрек; 3 — буровой штрек;

4 — верхняя рассечка отрезной щели; 5 — нижняя рассечка отрезной щели; 6 — заходка

[**Fig. 1.** Preparation of a block for leaching with a combination of workings: 1 — irrigative drill drift; 2 — lower storey drift; 3 — drill drift; 4 — upper cutting of the slot; 5 — lower cutting of the slot; 6 — stope]

**Дробление руды.** Качество дробления руды для выщелачивания определяет полноту и время извлечения полезного компонента из руды, и экономическую эффективность технологии. Для выщелачивания благоприятны рудные куски класса +0—50 мм. Если при традиционных способах могут считаться габаритными куски размерами 1000 мм и более, то для выщелачивания считаются негабаритом даже фракции +200 мм.

Это объясняется тем, что данная технология не предполагает контакта работающего с раздробленной рудой и ошибка при взрывном дроблении не может быть скорректирована в процессе выпуска, как это происходит при традиционной технологии.

Другая важная задача — равномерность уплотнения руды в блоке. Руда разрыхляется только в пределах определенного объема эллипсоида, а в остальном пространстве остается неподвижной, поэтому локальное компенсационное пространство для отбойки очередного слоя формируется за счет частичного выпуска руды из ранее отбитого слоя.

Это обстоятельство приоритетно при определении параметров буро-взрывных работ, потому что и недостаточное уплотнение и чрезмерное уплотнение препятствуют процессу инфильтрационного выщелачивания, лишая технологии ее преимуществ над традиционной.

**Орошение руды.** При выщелачивании скальных руд на месте залегания чаще всего применяется инфильтрационная схема, основанная на движении потока реагента от оросителей к дренажным устройствам под действием сил гравитации. Раствор не заполняет пустоты между кусками руды, а лишь покрывает их пленкой.

Растворы для орошения подают по буровым скважинам в массиве, с использованием разбрызгивателей типа форсунок и по скважинам, пробуренным по разрушенной массе и обсаженным перфорированными трубами. Лучшие показатели имеет третий вариант, но широкое его применение тормозится отсутствием надежных средств бурения скважин (известные механизмы позволяют бурить на глубину до 20–25 м). Все виды скважинных оросителей — точечные источники, радиус зоны влияния которых, редко превышает 1 м.

Особенность проектирования системы орошения заключается в том, что механизм проникновения раствора вглубь куска является результирующим и определяет экономическую целесообразность применения технологии в качестве альтернативы традиционной технологии.

**Сбор растворов.** Растворы собирают в нижней части блока — днище. Борьба с миграцией растворов за пределы рабочей зоны осуществляется с помощью противодиффузионных завес, создаваемых нагнетанием вяжущих материалов в разрушенные породы или гидроизоляции водонепроницаемыми материалами. На месторождении «Быкогорское» отбор утечек вакуумными насосами обеспечивал санитарную безопасность водолечебных курортов на расстоянии 6 км от рудника подземного выщелачивания металлов из руд.

Особенность проектирования данного элемента системы заключается в решении проблем как промышленной санитарии, так и жизнедеятельности в окрестных регионах.

**Интенсификация процесса.** Широкое применение нашел метод воздействия с помощью взрывных работ, поэтому при конструировании систем стараются сохранить подготовительные выработки при проведении взрывов и использовать их для целей интенсификации. Из всех известных методов интенсификации практическое применение нашел только буровзрывной посредством деформирования массива выщелачиваемых руд работой взрывных газов и волны. К нему в равной мере применимы требования сохранения оптимальной для движения растворов крупности минеральных отдельностей.

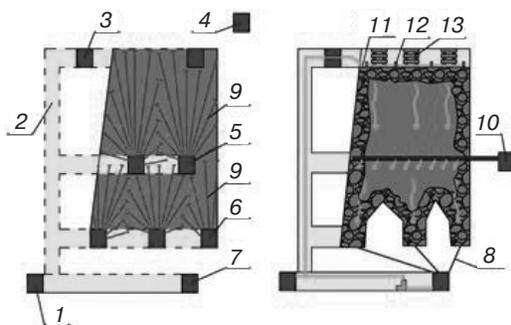
**Примеры выщелачивания руд.** При проектировании систем подземного выщелачивания может быть использована практика добычи урана подземным выщелачиванием сернокислыми растворами в течение более полувека.

Месторождение Восток (Северный Казахстан) представляет собой линзовидное рудное тело неправильной формы в интенсивно рассланцованных осадочных породах крепость 4–6 по шкале проф. М.М. Верхняя часть месторождения отработана системами с обрушением.

Схема подготовки и нарезки блока представлена на рис. 2.

Монтажный слой шириной 6 м, высотой 2–3 м был предназначен для бурения скважин и размещения оросительной системы. Подсечной слой был проведен с уклоном 5° к центру блока. Для гидроизоляции по площади днища блока укладывали поливинилхлоридную пленку толщиной 3 мм, защищенную сверху деревянным настилом и рудной подушкой.

Отрезной восстающий сечением 2×2 м был пройден на всю высоту блока, а на него с помощью взрывных скважин была образована отрезная щель шириной 2 м и длиной 5 м.



**Рис. 2.** Подготовка и нарезка блока выщелачивания: 1 — принимающий растворы штрек; 2 — восстающий; 3 — подающий растворы штрек; 4 — выработка; 5 — буровые штреки; 6 — дренажно-буровые штреки; 7 — дренажный штрек; 8 — дренажные скважины; 9 — взрывные скважины; 10 — промежуточный горизонт орошения; 11 — штрек орошения; 12 — верхняя подсечка; 13 — костровая крепь

**[Fig. 2.** Preparation and cutting of the leaching unit: 1 — drift receiving the solutions; 2 — raise; 3 — drift feeding the solutions; 4 — working; 5 — drill drifts; 6 — drainage-drill drifts; 7 — drainage drift; 8 — drainage wells; 9 — explosive wells; 10 — intermediate irrigation horizon; 11 — irrigation drift; 12 — upper cutting; 13 — chock support]

Скважины бурили станком НКР-100 м с монтажного слоя параллельно друг другу согласно падению рудного тела. До кровли нижней подсечки скважины не добуривали на 1,5 м.

Короткозамедленное с интервалом замедления между рядами 25 мс взрывание осуществлено электрическим способом по встречной схеме с дублированием детонирующим шнуром. Общий вес заряда составил 4200 кг, коэффициент разрыхления — 1,12.

Магазинированная руда выщелачивалась в течение 6,5 месяцев, после чего концентрация металлов в продукционных растворах снизилась ниже допустимого уровня.

Для уточнения параметров опытно-промышленного выщелачивания по за-магазинированной руде были пройдены рассечки до границ рудного тела с креплением неполными дверными окладами [7].

Обследованием выработок установлено:

- в зоне отрезной щели произошло переуплотнение руды;
- дробление массива на мелкие фракции происходило в зоне действия взрыва скважин, равной 2—3 диаметрам заряда;
- наиболее интенсивно растворы двигались по трещинам и переизмельченной руде ближайшей зоны действия взрыва, а также в районе лежащего бока, где массив был разрушен на фракции до 0,4 м.

Повторное взрывание массива было осуществлено взрывными скважинами диаметром 85 мм и 65 мм. Скважины заряжали гранулитом АС-4.

На I подэтаже взорвано 35 скважин диаметром 105 мм и 15 — диаметром 65 мм в три серии с замедлением между сериями — 25 мс. Подэтаж II подвергся повторному дроблению веерами скважин диаметром 65 мм. Компенсационное пространство в районе отрезной щели было образовано мелко-шпуровым способом. Взрывание осуществлялось шестью сериями с замедлениями 25 мс. На подэтаже

Ш повторное дробление произведено с помощью скважин в шесть серий с замедлением 25 мс.

На повторное дробление магазинированной руды затрачено 5120 кг ВВ. Удельный расход ВВ на вторичное дробление составил  $1,55 \text{ кг/м}^3$ , достигнутый коэффициент разрыхления — 1,43.

После повторного дробления магазинированной руды выщелачивание продолжалось 4,5 месяца с получением объема продукции, составляющего 1,22 объема, полученного за первый период выщелачивания.

На месторождении Звездное (Северный Казахстан) опытно-промышленный блок № 2 был заложен висячем боку рудной залежи. Длина блока составляла 60 м, ширина — от 26 м в центре до 10 м на флангах. Высота блока без учета блоковых целиков составляла 36 м. Продукционные растворы уловлялись системой из дренажных скважин и дренажного штрека.

Руда орошалась по скважинам, пробуренным из оросительного штрека, а также с поверхности магазинированной руды. Отбойка руды производилась восходящими скважинами с опережением отбойки верхнего подэтажа по отношению к нижнему подэтажу на величину линии наименьшего сопротивления (2,6 м).

Взрывание осуществлялось с внутривеерным замедлением и использованием ступеней 25, 30, 75 и 100 мс. Перед отбойкой каждого слоя в торцах дренажно-буровых штреков производился частичный выпуск отбитой горной массы для формирования объема компенсации.

Бурение скважин осуществлялось станками типа НКР-100, зарядание — пневмозарядчиками ЗП-5. Горная масса отгружалась погрузочно-доставочными машинами МПДН-1М.

Параметры подготовки блока выщелачивания буро-взрывными работами представлены на рисунке 3.

Руда обрушалась вначале на отрезную щель, образованную взрыванием вертикальных скважин на пройденный посередине блока отрезной восстающий, а впоследствии в «зажиме» от центра блока к западному флангу, а затем к восточному флангу. Величина заряда на одну ступень изменялась от 200 до 600 кг, а количество одновременно взрываемого ВВ достигало 2,5 т.

Выщелачивание блока № 2 продолжалось в течение 1 года. Орошение руды с промежуточного горизонта орошения по обуренным по магазинированной руде и обсаженным их перфорированными трубами скважинам желаемого результата не принесло. Содержание продукционных растворов снизилось до минимума, расход реагента практически прекратился.

Для выявления причин неудовлетворительных показателей процесса по магазинированной руде была проведена контрольная выработка длиной 28 м с документацией бортов выработок и отбором проб руды.

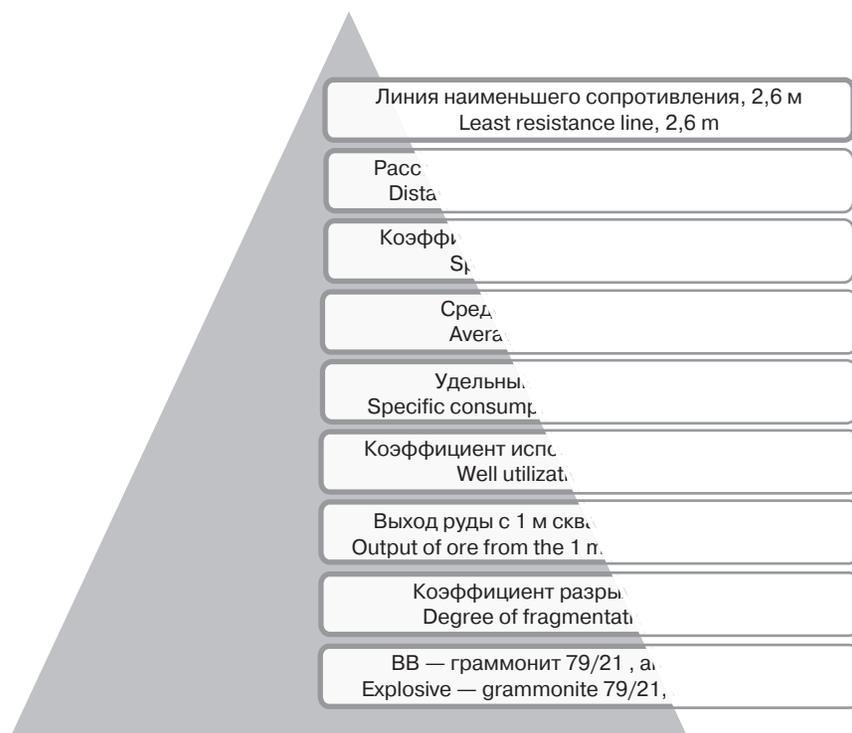
Исследованием установлено:

— выход негабаритного класса в 3 раза превысил расчетные данные, что подтверждает корректность оценки качества дробления лишь для зоны эллипсоида разрыхления;

— участок между буровыми штреками и междуштрековых целиков раздроблен неудовлетворительно;

— выявлены зоны переуплотненной переизмельченной руды с переотложениями солей и каналы повышенной фильтрации.

Для интенсификации процесса выщелачивания частично выщелоченная руда была обрушена из бурового штрека вертикальными взрывными скважинами. В центре блока в днище параллельными скважинами была образована отрезная щель высотой 6 м, на которую послойно взрывали веера скважин. Взрывная интенсификация процесса повысила содержание металлов в продукционных растворах на первые проценты.



**Рис. 3.** Параметры подготовки блока выщелачивания буро-взрывными работами  
[Fig. 3. Parameters of block preparation for leaching by drilling and explosive works]

Несомненными преимуществами метода выщелачивания металлов являются его экономичность, повышенная по сравнению с традиционным способом безопасность работ и сохранность внешней среды [8—13]. Он позволяет произвести доработку запасов, считавшихся до недавнего времени безвозвратно потерянными, на отработанных месторождениях в охранных целиках, зонах обрушения и др.

Обладая преимуществами технического и экологического плана, подземное выщелачивание в недалеком будущем может занять приоритетные позиции при добыче полезных ископаемых. Успех его освоения зависит от качества, в том числе, и подготовки руды в блоках выщелачивания [14—17].

Исследование горных аспектов выщелачивания и разработка научных основ его осуществления является одной из важнейших задач технологии горнодобывающего производства, от решения которой зависит создание высокопроизводительных схем извлечения полезных ископаемых из недр.

Опыт подземного выщелачивания балансовых и забалансовых руд, накопленный, прежде всего, в ураново-добывающей отрасли позволяет формировать научно — методическую базу для расширения области применения технологий выщелачивания металлов в других горных отраслях [18–20].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Franks, D.M., Boger, D.V., Côte, C.M., Mulligan, D.R.* 2011. Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes. *Resources Policy*. Vol. 36. No. 2. Pp. 114–122.
- [2] *Корнилков С.В., Яковлев В.Л.* О методологическом подходе к исследованиям в области освоения недр на основе системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности // *Горный журнал*. 2015. № 1. С. 56–60.
- [3] *Golik V.I., Razorenov Yu.I., Efremkov A.B.* Recycling of metal ore mill tailings // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Т. 682. С. 363–368.
- [4] *Ракишев Б.П.* Комплексное использование руды на предприятиях цветной металлургии Казахстана // *Горный журнал*. 2013. № 7. С. 67–69.
- [5] *Бубнов В.К., Спирин Э.К., Голлик В.И.* [и др.]. Теория и практика добычи полезных ископаемых для комбинированных способов выщелачивания. Целинград: Жана-Арка, 1992. 545 с.
- [6] *Голлик В.И., Брюховецкий О.С., Габараев О.З.* Технологии освоения месторождений урановых руд: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по горно-геологическим специальностям. М.: Федеральное агентство по образованию; Российский гос. геологоразведочный ун-т им. Серго Орджоникидзе, 2007. 131 с.
- [7] *Бубнов В.К., Голлик В.И., Капканщиков А.М.* [и др.]. Актуальные вопросы добычи цветных, редких и благородных металлов. Акмола, 1995. 601 с.
- [8] *Ляшенко В.И., Колоколов О.В.* Совершенствование технологии подземного выщелачивания при разработке рудных месторождений сложной структуры // *Науковий вісник НГУ*. 2006. № 7. С. 11–17.
- [9] *Ляшенко В.И., Голлик В.И.* Природоохранные технологии подземной разработки урановых месторождений // *Горный журнал*. 2006. № 2. С. 89–92.
- [10] *Воробьев А.Е., Разоренов Ю.И., Игнатов В.Н., Джимиева Р.Б.* Инновационные геотехнологии разработки месторождений горючего сланца и высоковязкой нефти: учеб. пособие для магистрантов, обучающихся по горно-геологическим и нефтяным специальностям. Новочеркасск, 2008, 214 с.
- [11] *Разоренов Ю.И., Голлик В.И.* Проблемы глубокой утилизации отходов переработки угля // *Маркшейдерия и недропользование*. 2013. № 4 (66). С. 52–54.
- [12] *Khasheva Z.M., Golik V.I.* The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus // *International Business Management*. 2015. Т. 9. № 6. С. 1210–1216.
- [13] *Комащенко В.И., Васильев П.В., Масленников С.А.* Технологиям подземной разработки месторождений КМА — надежную сырьевую основу // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016. № 2. С. 101–114.
- [14] *Голлик В.И., Полухин О.Н.* Природоохранные геотехнологии в горном деле. Белгород: ИД Белгород; НИУ Бел ГУ, 2013. 282 с.
- [15] *Дмитрак Ю.В.* Эффективность вибро-транспортирования материалов // *Научный вестник ЮИМ*. 2017. № 4. С. 24–29.
- [16] *Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н.* АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» — Путь длиной в 65 лет // *Горный журнал*. 2016. № 3. С. 6–12.
- [17] *Качурин Н.М., Стась Г.В., Калаева С.З.К., Корчагина Т.В.* Геоэкологическая оценка эффективности защиты окружающей среды и природоохранительных мероприятий при подземной добыче угля // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016. № 3. С. 63–81.

- [18] Качурин Н.М., Стась Г.В., Левин А.Д., Рыбак В.Л. Аэродинамика породных отвалов угольных шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. № 1. С. 23—33.
- [19] Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. 2015. Т. 157. Р. 306—324.
- [20] Jarvie-Eggart M.E. Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World. — Englewood: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.

© Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И., 2017

#### **История статьи:**

Дата поступления в редакцию: 01 октября 2017

Дата принятия к печати: 15 января 2018

#### **Для цитирования:**

Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И. Особенности конструирования систем подземного выщелачивания металлов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 80—91. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-80-91

#### **Сведения об авторах:**

Голик Владимир Иванович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского государственного технологического университета. *Область научных интересов:* природоохранные и ресурсосберегающие технологии разработки месторождений полезных ископаемых. *Контактная информация:* e-mail: v.i.golik@mail.ru

Разоренов Юрий Иванович — доктор технических наук, профессор, проректор Южно-Российского государственного политехнического университета. *Область научных интересов:* природоохранные и ресурсосберегающие технологии разработки месторождений полезных ископаемых. *Контактная информация:* e-mail: yiri1963@mail.ru

Ляшенко Василий Иванович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела Украинского научно-исследовательского и проектно-изыскательского института промышленной технологии Министерства топлива и энергетики Украины. *Область научных интересов:* природоохранные и ресурсосберегающие технологии разработки месторождений полезных ископаемых. *Контактная информация:* e-mail: inform@iptzw.dp.ua

## **SPECIAL FEATURES OF CONSTRUCTING SYSTEMS FOR UNDERGROUND LEACHING OF METALS**

**V.I. Golik<sup>1</sup>, Yu.I. Razoryonov<sup>2</sup>, V.I. Lyashenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> North-Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University)

44, Nikolaev str., Vladikavkaz, 362021, Russian Federation

<sup>2</sup> Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

132, Prosveschenia str., Novocherkassk, Rostov Region, 346428, Russian Federation

<sup>3</sup> Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology

37, Boulevard Svobody str., Dnipropetrovsk region, Zhovti Vody, 52204, Ukraine

The relevance of the work is attributed to the possibility of engaging stocks of low-grade ores in mining, which is prevented by insufficient knowledge of the leaching process. Preparation of ores is carried out without accounting for all properties of minerals and modes of solution movement, which increases the cost of mining, increases the loss of useful components and degrades the technical-economic criteria.

The aim of this work is to systematize the theory and practice of using leaching technology with optimization of the mineral resources utilization criterion, accumulated in the uranium-mining industry of the USSR. The article contains the description of the processes carried out in mining practice for the first time.

Results. The fundamental distinction of the technology of leaching metals from ores as changing phase of metal explicitly in-situ is formulated. The features of layout design and the use of preparatory and development workings on the conditions of their reuse in the process, crushing by condition to ensure penetration of the reagent solution into the ore piece, irrigation as a process determining the economic purposefulness of the technology, collecting solutions and preventing leakage for industrial sanitation and human health are described. The features of intensification of the drill-and-blast leaching process by deformation of the volume of leachable ore with of explosive gases and stress waves are distinguished. Examples of accounting for special features of ore deposits leaching in the USSR are presented. The practice of monitoring the completeness of leaching by excavation workings on leached ore is described. A brief description of the benefits of leaching technology in cleaning up the stocks lost by the traditional technology is given.

Conclusion. It is noted that underground leaching may take priority positions in mining, so development of scientific basics for its implementation is one of the most important tasks of mining production, accomplishing which affects the creation of highly productive and waste-free systems of extraction of useful minerals from the subsoil. The experience of the ISL allows to create a methodological basis for expanding the scope of metal leaching technologies. The article contains the description of the processes carried out for the first time in mining practice.

**Key words:** leaching, ore, systemization, subsoil, metal, engineering, crushing, chemical reagent, irrigation, intensification, traditional technology, stocks

## REFERENCES

- [1] Franks, D.M., Boger, D.V., Côte, C.M., Mulligan, D.R. 2011. Sustainable Development Principles for the Disposal of Mining and Mineral Processing Wastes. *Resources Policy*. Vol. 36. No. 2. Pp. 114–122.
- [2] Kornilkov S.V., YAKovlev V.L. Methodology-based approach to the research in the area of mineral exploration and mining based on systematic, integrated, inter-disciplinary and innovation strategy. *Gornyi Zhurnal (Mining Journal)*. 2015. No. 1. P. 56–60. (in Russ.).
- [3] Golik V.I., Razorenov Yu.I., Efremenkov A.B. Recycling of metal ore mill tailings // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. T. 682. S. 363–368.
- [4] Rakishev B.R. Comprehensive resource use in the nonferrous metals industry in Kazakhstan. *Gornyi Zhurnal (Mining Journal)*. 2013. No. 7. P. 67–69. (In Russ.).
- [5] Bubnov, V.K., Spirin E.K., Golik V.I., et al. Teorija i praktika dobychi poleznyh iskopaemyh dlja kombinirovannyh sposobov vyshhelachivaniya [Theory and practice of mining for combined methods of leaching]. Tselinograd: Zhana-ARKA, 1992. (in Russ.).
- [6] Golik V.I., Bryukhovetskiy O.S., Gabaraev O.Z. Tehnologii osvoenija mestorozhdenij uranovyh rud [Technology of development of uranium ore deposits] // textbook for students of higher educational institutions enrolled in mining and geological professions; Federal Agency of Education, Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze. Moscow, 2007. 131 p. (in Russ.).
- [7] Bubnov, V.K., Golik V.I., Kapkanschikova A.M. and others. Aktual'nye voprosy dobychi cvetnyh, redkih i blagorodnyh metallov [Relevant issues of production of non-ferrous, rare and noble metals]. Akmola, 1995. 601 p. (in Russ.).

- [8] Lyashenko V.I., Kolokolov, O.V. Sovershenstvovanie tehnologii podzemnogo vyshhelachivaniya pri razrabotke rudnyh mestorozhdenij slozhnoj struktury [Improvement of technology of underground leaching in development of ore deposits of complex structure]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2006. No. 7. P. 11—17. (in Russ.)
- [9] Lyashenko V.I., Golik V.I. Prirodookhrannyye tekhnologii podzemnoy razrabotki uranovykh mestorozhdeniy [Conservation technologies of underground development of uranium deposits]. *Gornyi Zhurnal (Mining Journal)*. 2006. No. 2. P. 89—92. (in Russ.)
- [10] Vorob'ev A.E., And Razorenov Yu.I., Ignatov, V.N., Gimaeva R.B. Innovacionnyye geotekhnologii razrabotki mestorozhdenij gorjuchego slanca i vysokovjazkoj nefiti [The innovative geotechnologies of development of deposits of oil shale and heavy oil] // textbook for graduate students in geological and oil industry. Novocherkassk, 2008. 214. (in Russ.).
- [11] Razorenov Yu.I., Golik V.I. 2013. Problemy glubokoy utilizatsii otkhodov pererabotki uglya [Problems of deep utilization of coal processing waste]. *Marksheideriya i nedropolzovaniye [Mine surveying and subsurface use]*. 2013. 4 (66). P. 52—54. (in Russ.).
- [12] Khasheva Z.M., Golik V.I. The ways of recovery in economy of the depressed mining enterprises of the Russian Caucasus. *International Business Management*. 2015. Vol. 9. No. 6. P. 1210—1216.
- [13] Komashenko, V.I., Vasilyev, P.V., Maslennikov, S.A. Dependable raw materials base for underground mining the KMA deposits. *Izvestiya of the Tula State University. Earth Science*. 2016. No. 2. P. 101—114. (in Russ.)
- [14] Golik V.I., Polukhin O.N. Prirodookhrannyye geotekhnologii v gornom dele [Environmental geotechnology in mining]. Belgorod: ID Belgorod; NRU Bel GU, 2013. (in Russ.).
- [15] Dmitrak Y.V. The effectiveness of vibrosensitivity materials. *Scientific journal of UIM*. 2017. No. 4. P. 24—29. (in Russ.).
- [16] Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. The Leading Research and Design Institute of Industrial Technologies — A long way in 65 years. *Gornyi Zhurnal (Mining Journal)*. 2016. No. 3. P. 6—12. (in Russ.).
- [17] Kachurin N.M., Stas G.V., Kalaev, S.Z.K., Korchagina T.V. Environmental evaluating efficiency of environmental protection and environmental measures by underground mining. *Izvestiya of the Tula State University. Earth Science*. 2016. No. 3. P. 63—81. (in Russ.).
- [18] Kachurin N.M., Stas G.V., Levin A.D., Ribak V.L. Aerodynamics of waste coal mines dumps. *Izvestiya of the Tula State University. Earth Science*. 2016. No. 1. P. 23—33. (in Russ.).
- [19] Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydro-metallurgy*. 2015. Vol. 157. P. 306—324.
- [20] Jarvie-Eggart M.E. *Responsible Mining: Case Studies in Managing Social & Environmental Risks in the Developed World.* — Englewood: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.

#### Article history:

Received: October 01, 2017

Accepted: January 15, 2018

#### For citation:

Golik V.I., Razoryonov Yu.I., Lyashenko V.I. (2018). Special features of constructing systems for underground leaching of metals. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(1), 80—91. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-80-91

#### Bio Note:

*Vladimir I. Golik* — Doctor of Technical Sciences, Professor of mining Department, North Caucasus State Technological University. *Research interests:* environmental and resource-saving technologies of mineral deposits development. *Contact information:* e-mail: v.i.golik@mail.ru

*Yury I. Razorenov* — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector of South-Russian State Polytechnic University. *Research interests*: environmental and resource-saving technologies of development of mineral de-positions. *Contact information*: e-mail yiri1963@mail.ru

*Vasily I. Lyashenko* — Candidate of Technical Sciences, senior researcher, head of the research Department of the Ukrainian Research and Development Institute of Industrial Technology of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. *Research interests*: environmental and resource-saving technologies of development of mineral de-positions. *Contact information*: e-mail: inform@iptzw.dp.ua



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-92-101

УДК 669.2

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ОБЖИГ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМТОР И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

М.Ю. Малькова, А.Н. Задиранов

Российский университет дружбы народов  
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 3

Проведены исследования кинетики изменения содержания фосфора, ниобия, ванадия и титана при высокотемпературном обжиге руды месторождения Томтор в смеси с активными добавками: бикарбонатом ( $\text{NaHCO}_3$ ), карбонатом натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), щелочами ( $\text{KOH}$ ,  $\text{NaOH}$ ). Предложено уравнение кинетики обжига руды и рассчитаны значения постоянной скорости высокотемпературного обжига руды для фосфора, ниобия, ванадия и титана при различных условиях. Получены зависимости постоянной скорости высокотемпературного обжига руды в атмосфере кислорода воздуха, аргона и молекулярного хлора от температуры обжига и содержания активных добавок. Установлено, что в атмосфере кислорода воздуха обжиг руды проходит наиболее эффективно с добавками  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ , взятыми в соотношении (1:1). Показано, что обжиг руды в смеси с карбонатами и щелочами позволяет переводить в раствор при последующем выщелачивании не менее 95,0% фосфора и 44,0% ванадия, содержащихся в исходной руде. Установлено, что наибольшей скоростью в атмосфере кислорода воздуха характеризуется обжиг руды в смеси с  $\text{NaHCO}_3$  и  $\text{NaOH}$ . Рассчитаны постоянные скорости этого процесса для фосфора и ванадия. Установлено, что образующийся после обжига руды кек, требует дополнительной переработки, поскольку содержит высокие концентрации ванадия и других ценных металлов.

**Ключевые слова:** руда, месторождение Томтор, кек, ниобий, ванадий, титан, фосфор, обжиг, кинетика, редкоземельные металлы

### Введение

Известно [1–8], что руды месторождения Томтор являются уникальным источником редкоземельных металлов (далее РЗМ), ниобия и других ценных металлов. В связи с минералогическими особенностями [9–14] переработка руды месторождения Томтор методами традиционного обогащения признана малоэффективной, требуя разработки специальной схемы. Однако учитывая значительные содержания в руде редкоземельных элементов (~12%) и относительно высокое содержание ниобия (~6%  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) [1; 4–8], в настоящее время перспективным и экономически оправданным представляется применение комбинированных методов пиро- и гидрометаллургии.

Цель данной работы заключается в изучении особенностей высокотемпературного обжига руды месторождения Томтор в смеси с активными добавками: гидрокарбонатом ( $\text{NaHCO}_3$ ), карбонатом натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) и щелочами ( $\text{KOH}$ ,  $\text{NaOH}$ ). Для выполнения цели работы провели серию лабораторных испытаний,

посвященных изучению кинетики обжига измельченной руды в смеси с  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , KOH и NaOH.

### Методика проведения экспериментов

Обжиг подготовленных проб руды вели на установке (рис. 1), где алундовый тигель со смесью помещали в нагревательную печь 7 для обжига. Продували тигель газом (аргон, хлор) через фурму 4. Расход газа составлял 0,2 л/мин. Длительность обжига смеси составляла от 1 до 5 ч. По окончании обжига тигель извлекали из печи, а находящийся в нем материал (промпродукт) охлаждали, загружали в химический стакан, заливали водой и перемешивали магнитной мешалкой. Образовавшийся в стакане нерастворимый осадок фильтровали. Отфильтрованный осадок снова загружали в химический стакан, повторяя процессы перемешивания и фильтрации. После последней фильтрации осадок высушивали в печи при температуре 150 °С в течение 1,5 ч. Образовавшийся сухой осадок (кек) взвешивали, от него отбирали пробу для проведения химического анализа.

Эффективность перевода элементов руды в раствор оценивали, определяя уровень остаточного содержания  $i$ -го компонента руды, %:

$$\Delta_{\text{ост}} = (C_{\text{к}}/C_{\text{н}})100, \quad (1)$$

а также используя уравнение кинетики первого порядка:

$$v = dC/dt = -kC, \quad (2)$$

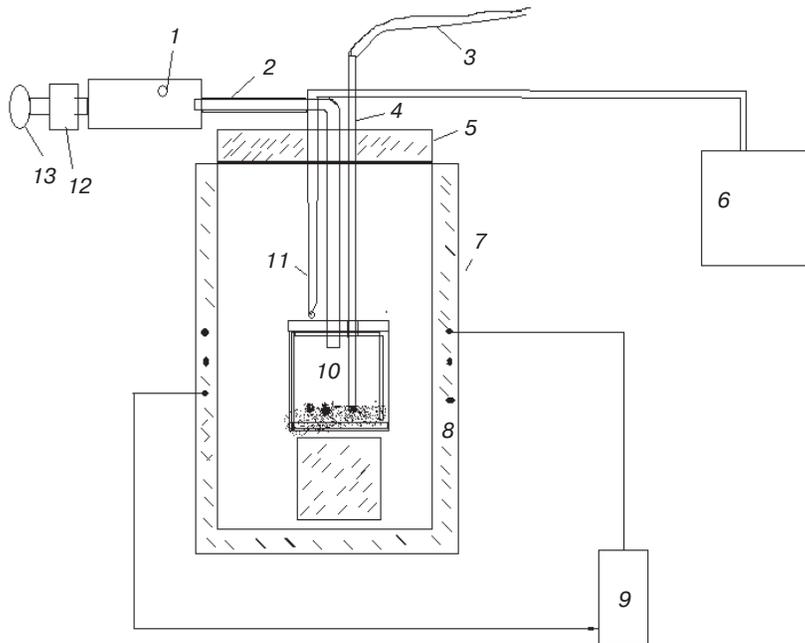
решение которого принимает следующий вид:

$$k_i = \ln(C_{\text{н}}/C_{\text{к}})/t, \quad (3)$$

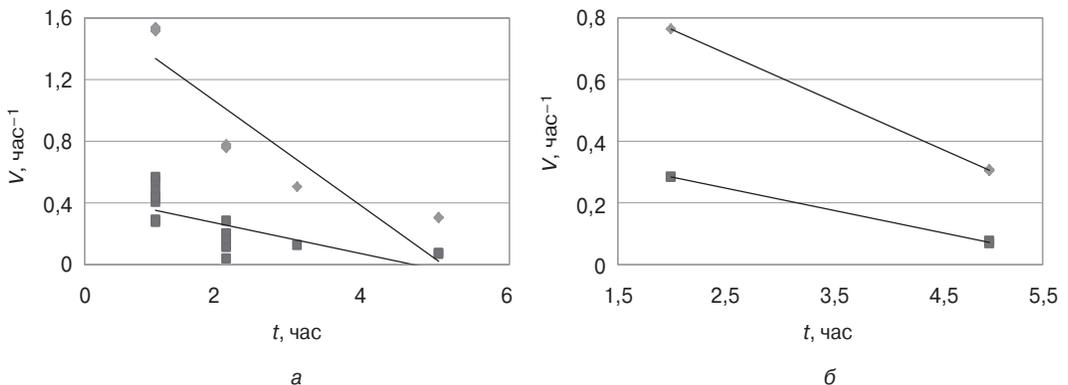
где  $k_i$  — постоянная скорости процесса обжига  $i$ -го компонента измельченной руды,  $\text{с}^{-1}$ ;  $C_{\text{н}}$  и  $C_{\text{к}}$  — начальная и конечная концентрации элемента руды, %;  $t$  — длительность обжига руды, с.

### Результаты экспериментов

Результаты проведенных серий экспериментов и расчетные значения  $\Delta_{\text{ост}}$  и  $k_i$  (рис. 1, таблица) с высокой степенью вероятности ( $R^2 > 76,97\%$ ) показывают, что значения постоянной скорости ( $k_i$ ,  $\text{с}^{-1}$ ) высокотемпературного обжига руды (в атмосфере воздуха) в значительной мере определяют состав смеси (соотношение основного компонента и разбавителя) и условия ее обработки на всем интервале температур эксперимента (750–900 °С). Так, обжиг измельченной руды в смеси (1:1) с гидрокарбонатом натрия ( $\text{NaHCO}_3$ ) показал, что остаточные содержания фосфора и ванадия в кеке после его выщелачивания ( $\Delta_{\text{ост}}$ ) составляют 5,49 и 61,9% от их доли в исходной руде. При этом сам процесс характеризуется следующими значениями постоянной уравнения скорости ( $K_{\text{р}}$  и  $K_{\text{в}}$ ):  $2,7255 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  ( $0,27255 \text{ мс}^{-1}$ ),  $R^2 = 0,7697$  по фосфору и  $0,4816 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  ( $0,0482 \text{ мс}^{-1}$ ),  $R^2 = 0,7877$  по ванадию, соответственно.



**Рис. 1.** Установка для обжига руды: 1 — короб с подсосами воздуха для смешения газов из тигля; 2 — стеклянная трубка с теплоизоляцией; 3 — соединительный шланг для подачи газа (Ar) из баллона; 4 — фурма; 5 — огнеупорная крышка печи; 6 — регистрирующий прибор; 7 — печь нагрева; 8 — нагревательный элемент; 9 — трансформатор напряжения; 10 — алундовый тигель; 11 — термопара; 12 — солевой фильтр для очистки газов; 13 — воздушный насос  
[Fig. 1. Equipment for ore roasting: 1 — box with air suction for mixing gases from the crucible; 2 — glass tube with thermal insulation; 3 — connecting hose for supplying gas (Ar) from a cylinder; 4 — lance; 5 — fire-resistant furnace cover; 6 — recording device; 7 — heating furnace; 8 — heating element; 9 — voltage transformer; 10 — alundum crucible; 11 — thermocouple; 12 — salt filter for gas purification; 13 — air pump]



**Рис. 2.** Скорость обжига руды в смеси с активными добавками ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$  и  $\text{KOH}$ ) и кека в атмосфере кислорода воздуха (а) и аргона (б):  $\blacklozenge$  — фосфор;  $\blacksquare$  — ванадий  
[Fig. 2. Rate of roasting of ore mixed with active additives ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$  and  $\text{KOH}$ ) and cake in the atmosphere of oxygen (a) and argon (b):  $\blacklozenge$  — phosphorus;  $\blacksquare$  — vanadium]

Обжиг руды в смеси с карбонатом натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) в соотношении (1:1) при том же интервале температур показал, что минимальные значения  $\Delta_{\text{ост}}$  составляют следующие интервалы, %: по фосфору — 46—87, по ванадию — 71—76. При

этом значения  $K_f$  соответственно равны: по фосфору ( $\text{мс}^{-1}$ ) 0,4778 ( $R^2 = 0,7179$ ), по ванадию — 0,5464 ( $R^2 = 0,951$ ). Другой вариант обработки руды — перемешивание с NaOH в соотношении (1:1) и последующий обжиг смеси — позволяют при последующем выщелачивании полученного остатка перевести в раствор, % до 64,5 фосфора и до 42 ванадия и при этом получить следующие значения постоянной скорости процесса:  $K_p = 2,4219 \text{ мс}^{-1}$  ( $R^2 = 0,9864$ ),  $K_v = 1,0175 \text{ мс}^{-1}$  ( $R^2 = 0,8776$ ). Для случая, когда в качестве разбавителя смеси выступает KOH, взятый в том же соотношении к руде, минимальные значения параметра  $\Delta_{\text{ост}}$  по фосфору и ванадию составляют 28 и 57%, соответственно. При этом  $K_p = 1,8178 \text{ мс}^{-1}$  ( $R^2 = 0,7923$ ),  $K_v = 0,4003 \text{ мс}^{-1}$  ( $R^2 = 0,8207$ ).

Таблица

**Кинетика высокотемпературного обжига руды месторождения Томтор**  
**[Kinetics of high-temperature roasting of ore from “Tomtor” field]**

Элемент [Element]	Содержание, % [Contents, %]			T, °C	t, ч [hour]	$10^4 \cdot K, \text{ с}^{-1}$		Состав смеси [Mixture composition]			
	начальное [initial]	конечное [final]	$\Delta_{\text{ост}}$			P	V				
P	9,3	1,5	16,13	750	2	2,7255; $R^2 = 0,7697$	0,4816; $R^2 = 0,7877$	Измельченная руда+ NaHCO <sub>3</sub> (1:1) [Crushed ore + NaHCO <sub>3</sub> (1:1)]			
V	0,89	0,7	78,65								
P	9,1	0,75	8,24	800	1						
V	0,9	0,6	66,67								
P	9,2	0,45	4,89	850	1						
V	1,05	0,65	61,9								
P	9,1	0,5	5,49	900	3						
V	1,02	0,7	68,63								
P	9,5	7,15	75,26	750	2				2,4219; $R^2 = 0,9864$	1,0175; $R^2 = 0,8776$	Измельченная руда+ NaOH (1:1) [Crushed ore + NaOH (1:1)]
V	0,94	0,87	92,53								
P	9,3	3,6	38,71	800	1						
V	1,08	0,63	58,33								
P	9,25	3,1	33,51	850	1						
V	0,94	0,61	64,89								
P	9,16	6,7	73,14	900	2						
V	0,97	0,65	67,01								
P	9,5	6,5	68,42	750	2	1,8178; $R^2 = 0,7923$	0,4003; $R^2 = 0,8207$	Измельченная руда+KOH (1:1) [Crushed ore + KOH (1:1)]			
V	1,01	0,74	73,27								
P	9,3	3,44	36,99	800	1						
V	0,95	0,71	74,74								
P	9,1	2,9	31,87	850	1						
V	0,99	0,64	64,64								
P	9,2	2,56	27,83	900	2						
V	0,97	0,55	56,7								
P	9,3	8,05	86,56	750	2				0,4778; $R^2 = 0,7179$	0,5464; $R^2 = 0,951$	Измельченная Руда + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (1:1) [Crushed ore + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (1:1)]
V	1,08	0,82	75,93								
P	9,25	6,94	75,03	800	1						
V	0,94	0,68	72,34								
P	9,3	6,6	70,97	850	1						
V	0,89	0,61	68,54								
P	9,1	4,2	46,15	900	2						
V	0,9	0,64	71,11								

Элемент [Element]	Содержание, % [Contents, %]			T, °C	t, ч [hour]	10 <sup>4</sup> · K, с <sup>-1</sup>		Состав смеси [Mixture composition]
	начальное [initial]	конечное [final]	Δ <sub>ост</sub>			P	V	
P	9,3	1,5	16,13	750	5	0,4769; R <sup>2</sup> = 0,8591	0,9008; R <sup>2</sup> = 0,6525	Измельченная руда + NaOH + KOH (1:2,5:2,5) +Ar (0,2 л/мин) [Crushed ore + NaOH + KOH (1:2,5:2,5) + Ar (0,2 l/ min)]
V	1,08	0,25	23,15					
P	9,6	0,8	8,33	800	5			
V	1,05	0,15	14,28					
P	9,5	1,1	11,58	850	2			
V	0,94	0,025	2,65					
P	14,25	2,6	18,24	900	2			
V	1,07	0,21	19,62					

Рассмотрим результаты обжига смеси, составленной из руды и растворителя (NaOH + KOH) в соотношении (1:2,5:2,5), в защитной атмосфере (аргон). Предполагалось, что активное перемешивание газовой среды аргоном при содержании в смеси двух таких активных растворителей, как NaOH и KOH, обеспечит высокую глубину и скорость процесса обжига руды. Однако как показывают полученные данные эксперимента (рис. 2, а), присутствие аргона в атмосфере печи замедляет скорость процесса удаления фосфора ( $K_P = 0,4769 \text{ мс}^{-1}$ ) и ванадия ( $K_V = 0,9008 \text{ мс}^{-1}$ ). Тем не менее, глубина обработки руды методом обжига оказалась достаточно высокой. Так, благодаря лучшему перемешиванию печных газов, которое обеспечивает присутствие аргона, и удлинению времени обжига до 5 ч, минимальные значения  $\Delta_{\text{ост}}$  по фосфору и ванадию составляют 8,33 и 2,65%, соответственно. Иными словами, при выщелачивании продукта обжига смеси в раствор перешло до 92% фосфора и 97% ванадия, содержащихся в исходной руде.

Представляло интерес распределение по степени эффективности результатов обжига руды в смеси с различными растворителями. Видно (таблица), что наиболее высокую скорость извлечения фосфора ( $K_P = 0,2722 \text{ мс}^{-1}$ ) демонстрирует высокотемпературная обработка руды в смеси с гидрокарбонатом натрия (NaHCO<sub>3</sub>). Второе место по тому же показателю скорости процесса ( $K_P = 0,2422 \text{ мс}^{-1}$ ) занимает обжиг смеси (руда + NaOH). Третье и четвертое места занимает обжиг смеси руды с KOH ( $K_P = 0,1818 \text{ мс}^{-1}$ ) и Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ( $K_P = 0,0478 \text{ мс}^{-1}$ ). На последнем (пятом) месте стоит обжиг руды в смеси NaOH+KOH с одновременной продувкой аргоном ( $K_P = 0,0477 \text{ мс}^{-1}$ ). По извлечению фосфора при обжиге соответствующий ряд смесей (по растворителю) выглядит следующим образом: NaOH ( $K_V = 0,1017 \text{ мс}^{-1}$ ) → NaOH + KOH ( $K_V = 0,0901 \text{ мс}^{-1}$ ) → Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ( $K_V = 0,0546 \text{ мс}^{-1}$ ) → NaHCO<sub>3</sub> ( $K_V = 0,0482 \text{ мс}^{-1}$ ) → KOH ( $K_V = 0,04 \text{ мс}^{-1}$ ).

Однако учитывая большой удельный расход гидрокарбоната натрия (1:1), щелочей (NaOH и KOH) в варианте приготовления их смеси в соотношении (1:2,5:2,5) и высокую стоимость реактивов, практическое использование таких вариантов технологии первичной обработки руды с экономической точки зрения видится маловероятным. Опираясь на изложенное и рассматривая представленные варианты с точки зрения их практического применения, на первое место по скорости обжига целесообразно поставить обжиг руды в смеси с NaOH. Обжиг руды в сме-

сях с КОН и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  выводит обозначенные варианты обработки руды по фосфору на второе и третье места. Соответственно по извлечению ванадия первое место по скорости данного процесса занимает обжиг руды в смеси с NaOH, второе и третье места — за вариантами обжига руды в смеси с  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , и КОН, соответственно.

В целом, полученные данные по  $K_p$ ,  $K_V$  и  $\Delta_{\text{ост}}$  говорят о высокой эффективности операции обжига измельченной руды в смеси с каустической содой и щелочами, поскольку эти операции являются наиболее простыми и недорогими в исполнении. В этой связи сделанный ранее вывод ставит на особое место обжиг руды в атмосфере аргона. Представляется, что его практическое применение будет регулироваться удельным расходом и рыночной стоимостью аргона.

Учитывая изложенное, можно сделать вывод о том, что обжиг руды в присутствии активных добавок показал свою высокую эффективность. При этом:

— обжиг руды в смеси с карбонатами и щелочами позволяет извлекать не менее 95,0% фосфора и 44,0% ванадия, содержащихся в исходном сырье;

— образующийся после обжига руды кек требует дополнительной переработки, поскольку, кроме фосфора и ванадия, содержит другие ценные компоненты (металлы), концентрации которых достаточно высоки.

### Выводы

1. Проведены серии лабораторных экспериментов по изучению кинетики высокотемпературного обжига руды в смеси с активными добавками  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , NaOH и КОН в атмосфере кислорода воздуха, аргона и молекулярного хлора. Установлено, что в атмосфере кислорода воздуха обжиг руды проходит наиболее эффективно с добавками  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , NaOH, взятыми в соотношении (1:1); применение аргона тормозит этот процесс.

2. Показано, что обжиг руды в смеси с карбонатами и щелочами позволяет переводить в раствор при последующем выщелачивании не менее 95,0% фосфора и 44,0% ванадия, содержащихся в исходной руде. Установлено, что образующийся после обжига руды кек требует дополнительной переработки, поскольку содержит высокие концентрации ванадия и других ценных металлов.

3. Предложено уравнение кинетики обжига руды и рассчитаны значения постоянной скорости ( $K_i$ ,  $\text{с}^{-1}$ ), где  $i$  — компонент руды. Показано, что это уравнение кинетики первого порядка. Установлено, что наибольшей скоростью в атмосфере кислорода воздуха характеризуется обжиг руды в смеси с  $\text{NaHCO}_3$  и NaOH. Рассчитаны постоянные скорости этого процесса для фосфора ( $K_p = 0,2422 \text{ мс}^{-1}$ ) и ванадия ( $K_V = 0,097 \text{ мс}^{-1}$ ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Малькова М.Ю., Задиранов А.Н.* Перспективы создания отечественной редкоземельной промышленности / сб. докл. VIII Междунар. науч.-практ. конф. РУДН «Инженерные системы — 2015». М.: Изд-во ИПК РУДН, 2015. С. 500—505.
- [2] *Петухов М.А.* Исследование процесса хлорирования танталито-колумбитового концентрата и создание технологии совместной переработки танталито-колумбитового и лопаритового концентратов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2010. 26 с.

- [3] Чуб А.В. Гибкие многоцелевые технологии глубокой переработки редкоэлементного сырья хлорным методом: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Соликамск, 1999. 16 с.
- [4] Данилов Ю.Г., Григорьев В.П. Томторское ниобий-редкоземельное месторождение как основная сырьевая база редкометалльной промышленности России / В сб.: Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера — 2016. Материалы Пятого Всеросс. науч. семинара: в 2-х ч. 2016. С. 329—335.
- [5] Пахомов А.А., Чомчоев А.И. Томторское месторождение редкоземельных металлов: варианты освоения / В сб.: Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия. III Международная научно-практическая конференция. 2014. С. 91—97.
- [6] Слепцов А.П., Томашев А.В., Рылов Д.А., Толстов А.В. Новое в методике подсчета запасов комплексных руд месторождения Томтор / В сб.: Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы VII Всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН. 2017. С. 575—581
- [7] Тарасов А.В., Демидов И.Л. Перспективы освоения Томторского месторождения редкоземельных металлов // Цветная металлургия. 2015. № 4. С. 29—36.
- [8] Литвинова Т.Е. Получение соединений индивидуальных РЗМ и попутной продукции при переработке низкокачественного редкометалльного сырья: дисс. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 318 с.
- [9] Архангельская В.В., Лагонский Н.Н., Усова Т.Ю., Чистов Л.Б. Руды редкоземельных металлов России // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. М.: ВИМС, 2006. № 19. 72 с.
- [10] Полякова М.А. Элементный состав редкоземельных руд и его влияние на оценку месторождений: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2002. 32 с.
- [11] Нечелюстов Г.Н., Коноплева Е.В., Коноплев А.Д. Минералого-геохимические особенности руд тонкодисперсных редкометалльных руд Томторского месторождения // Минеральное сырье. М.: ВИМС, 1997. № 1. С. 135—149.
- [12] Лапин А.В., Толстов А.В., Куликова И.М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных комплексных редкометалльных рудах месторождения Томтор // Геохимия. 2016. № 12. С. 1104—1121.
- [13] Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1080—1115.
- [14] Толстов А.В., Похиленко Н.П., Самсонов Н.Ю., Шепелев Н.В. Новые возможности обогащения и переработки комплексных руд месторождения Томтор / В сб.: Оборудование для обогащения рудных и нерудных материалов. Технологии обогащения. Материалы XII междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 20—31.

©Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., 2017

#### **История статьи:**

Дата поступления в редакцию: 18 декабря 2017

Дата принятия к печати: 11 января 2018

#### **Для цитирования:**

Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. Високотемпературный обжиг руды месторождения ТОМТОР и его особенности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 92—101. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-92-101

**Сведения об авторах:**

*Малькова Марианна Юрьевна* — доктор технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* металлургия черных и цветных металлов, нанотехнологии в металлургии, материаловедение, переработка техногенных отходов. *Контактная информация:* marianna300@yandex.ru

*Задиранов Александр Никитич* — доктор технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* металлургия черных и цветных металлов, нанотехнологии в металлургии, материаловедение, переработка техногенных отходов, литейное производство. *Контактная информация:* e-mail: zadiranov@mail.ru

## **A STUDY ON KINETICS OF ROASTING OF ORE FROM TOMTOR FIELD**

**M.Yu. Malkova, A.H. Zadiranov**

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

Research on kinetics of change of phosphorus, niobium, vanadium and titanium content during high-temperature roasting of ore from Tomtor field mixed with active additives: bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ ), sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), alkalis ( $\text{KOH}$ ,  $\text{NaOH}$ ) is conducted. An equation of ore roasting kinetics is proposed and values of constant rate of high-temperature ore roasting for phosphorus, niobium, vanadium and the titanium under various conditions are calculated. Relationships of constant rate of high-temperature ore roasting in the atmosphere of air oxygen, argon and molecular chlorine to the temperature of roasting and content of active additives are obtained. It is established that in the atmosphere of air oxygen, ore roasting is most effective with additions of  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaOH}$ , taken with the ratio (1:1). It is shown that roasting of ore in admixture with carbonates and alkalis can translate into a solution for subsequent leaching at minimum 95.0% of phosphorus and 44.0% of vanadium contained in the original ore. It is established that the greatest rate of roasting in the atmosphere of oxygen is characterized by ore roasting in a mixture of  $\text{NaHCO}_3$  and  $\text{NaOH}$ . The constant rates of that process for phosphorus and vanadium are calculated. It is established that filter cake forming after ore roasting requires further processing because it contains high concentrations of vanadium and other valuable metals.

**Key words:** ore of Tomtor field, cake, niobium, vanadium, titanium, phosphorus, roasting, kinetics, rare earth metals

### **REFERENCES**

- [1] Mal'kova M.Yu., Zadiranov A.N. Perspektivy sozdaniya otechestvennoi redkozemel'noi promyshlennosti [Prospects for creation of domestic rare-earth industry]. Collection of reports of the VIII International Scientific-Practical Conference of RUDN "Engineering systems — 2015". M.: RUDN Publishing, 2015. P. 500—505. (In Russ.).
- [2] Petukhov M.A. Issledovanie protsessa khlorirovaniya tantalito-kolumbitovogo kontsentrata i sozдание tekhnologii sovmestnoi pererabotki tantalito-kolumbitovogo i loparitovogo kontsetratov [A study of the chlorination process of tantalite-columbite concentrate and creation of technology

- of joint processing of tantalite-columbite and loparite concentrates]: thesis abstract... Cand. Tech. Sc. Moscow, 2010. 26 p. (In Russ.).
- [3] Chub A.V. *Gibkie mnogotselevye tekhnologii glubokoi pererabotki redkoelementnogo syr'ya khlornym metodom [Flexible, multi-purpose technologies of deep processing of rare element raw materials by chlorine method]: thesis abstract... Cand. Tech. Sc. Solikamsk, 1999. 16 p. (In Russ.).*
- [4] Danilov Yu.G., Grigor'ev V.P. *Tomtorskoe niobii-redkozemel'noe mestorozhdenie kak osnovnaya syr'evaya baza redkometal'noi promyshlennosti Rossii [Tomtor niobium-rare earth deposit as the main raw material base of the rare metal industry in Russia]. In the collection: Actual problems, directions and mechanisms of development of productive forces of the North — 2016. Materials of the Fifth all-Russian Scientific Seminar: in 2 parts. 2016. P. 329—335. (In Russ.).*
- [5] Pakhomov A.A., Chomchoev A.I. *Tomtorskoe mestorozhdenie redkozemel'nykh metallov: varianty osvoeniya [Tomtor field deposit of rare earth metals: alternatives of development]. In the collection: Scientific perspectives of the XXI century. Achievements and prospects of the new century. III International Scientific and Practical Conference. 2014. P. 91—97. (In Russ.).*
- [6] Sleptsov A.P., Tomashev A.V., Rylov D.A., Tolstov A.V. *Novoe v metodike podscheta zapasov kompleksnykh rud mestorozhdeniya Tomtor [A new method of calculation of reserves in the "Tomtor" field complex ore deposits]. In the collection: Geology and mineral resources of North-East Russia, Materials of the VII all-Russian Scientific-Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Geology of Diamond and Noble Metals, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. 2017. P. 575—581. (In Russ.).*
- [7] Tarasov A.V., Demidov I.L. *Perspektivy osvoeniya Tomtorskogo mestorozhdeniya redkozemel'nykh metallov [Prospects of development of the Tomtor field deposits of rare-earth metals]. Non-Ferrous Metallurgy. 2015. No. 4. P. 29—36. (In Russ.).*
- [8] Litvinova T.E. *Poluchenie soedinenii individual'nykh RZM i poputnoi produktsii pri pererabotke nizkokachestvennogo redkometal'nogo syr'ya [Obtaining individual compounds of rare earth metals and by-products in the processing of rare metal raw materials of low quality]. Diss. ... Doctor. Tech. Sc. St. Petersburg, 2014. 318 p. (In Russ.).*
- [9] Arkhangel'skaya V.V., Lagonskii N.N., Usova T.Yu., Chistov L.B. *Rudy redkozemel'nykh metallov Rossii [Ores of rare earth metals in Russia] // Mineral'noe syr'e. Seriya geologo-ekonomicheskaya. Moscow: VIMS publ., 2006. No. 19. 72 p. (In Russ.).*
- [10] Polyakova M.A. *Elementnyi sostav redkozemel'nykh rud i ego vliyanie na otsenku mestorozhdenii [Elemental composition of rare-earth ores and its influence on deposits allocation]: thesis abstract. ... Cand. Geol. Min. Sc. Moscow: IMGRE publ., 2002. 32 p. (In Russ.).*
- [11] Nechelyustov G.N., Konopleva E.V., Konoplev A.D. *Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rud tonkodispersnykh redkometal'nykh rud Tomtorskogo mestorozhdeniya [Mineralogical-geochemical features of fine rare-metal ores of Tomtor field deposit]. Mineral'noe syr'e. Moscow: VIMS publ., 1997. No. 1. P. 135—149. (In Russ.).*
- [12] Lapin A.V., Tolstov A.V., Kulikova I.M. *Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit. Geochemistry International. 2016. No. 12. P. 1104—1121. (In Russ.).*
- [13] Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., Tolstov A.V., Shcherbov B.L., Karmanov N.S., Gerasimov E.Yu., Bryanskaya A.V. *Major minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia). Russian Geology and Geophysics. 2015. Vol. 56. No. 6. P. 1080—1115. (In Russ.).*
- [14] Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Samsonov N.Yu., Shepelev N.V. *Novye vozmozhnosti obogashcheniya i pererabotki kompleksnykh rud mestorozhdeniya Tomtor [New opportunities of enrichment and processing of complex ores of Tomtor]. In the collection: Equipment for enrichment of ore and nonmetallic materials. Enrichment technologies. Proceedings of the XII international scientific and practical conference. 2016. No. 12. P. 1104—1121. (In Russ.).*

**Article history:**

Received: December 18, 2017

Accepted: January 11, 2018

**For citation:**

Malkova M.Yu., Zadiranov A.N. A study on kinetics of roasting of ore from tomto field. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 2018, 19(1). 92—101. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-92-101

**Bio Note:**

*Marianna Yu. Malkova* — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Construction, Peoples' Friendship University of Russia. *Scientific interests*: metallurgy of ferrous and non-ferrous metals, nanotechnology in metallurgy, materials science, recycling of industrial waste. *Contact information*: e-mail: marianna300@yandex.ru

*Alexandr N. Zadiranov* — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Construction, Peoples' Friendship University of Russia. *Scientific interests*: metallurgy of ferrous and non-ferrous metals, nanotechnology in metallurgy, materials science, recycling of industrial waste, foundry. *Contact information*: e-mail: zadiranov@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-102-111

УДК 622.691.24:624.953 (470.26)

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ОТБОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ И ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

И.А. Гуськова, Е.В. Леванова, И.Е. Белошапка

Альметьевский государственный нефтяной институт  
Российская Федерация, Республика Татарстан, 423452, Альметьевск, ул. Ленина, 2

Проблема рентабельной добычи нефти из карбонатных коллекторов с каждым годом приобретает все более актуальное значение в связи с уменьшением запасов нефти в терригенных коллекторах. Извлечение нефти из карбонатных коллекторов всегда связано с низкими фильтрационными свойствами матрицы породы и наличием густой сети трещин. К одному из наиболее эффективных методов на данном этапе разработки для карбонатных коллекторов можно отнести технологию нестационарного дренирования. Разработка технологии нестационарного дренирования продуктивных пластов путем определения эффективного времени воздействия с различными периодами работы и накопления скважины, за счет деформаций в трещинной системе, позволит снизить процент обводнения скважин. В результате перераспределения потоков жидкости в пласте вовлекаются не выработанные участки за счет капиллярной пропитки. Важным этапом при применении нестационарного воздействия является исследование оптических свойств нефти. Для оценки качества запасов вовлеченных в разработку в работе проводились лабораторные исследования эффективности нестационарного отбора 303-й залежи Ромашкинского нефтяного месторождения. Исследования проводились на спектрофотометре и хроматографе. Было установлено влияние нестационарного отбора на динамику работы скважин и на конечный КИН.

**Ключевые слова:** Нестационарный отбор, 303 залежь, Ромашкинское месторождение, коэффициент светопоглощения, хроматограф, спектрофотометр

В настоящее время, когда степень выработки начальных извлекаемых запасов терригенных отложений девона превышает 90%, все больше внимания уделяется трудноизвлекаемым запасам возвратных эксплуатационных объектов, к которым относятся карбонатные отложения нижнего и среднего карбона.

Извлечение нефти из карбонатных коллекторов всегда сопряжено с двумя факторами: низкими фильтрационными свойствами матрицы породы и наличием густой сети трещин, — что обусловлено условиями осадконакопления. На залежах 301—303 это усугубляется еще и тем, что нефтяная залежь подстилается достаточно активной подошвенной водой и имеются зоны разуплотнений коллекторов, так называемые зоны полного ухода бурового раствора [1—6]. Разработка технологии нестационарного дренирования продуктивных пластов 303-й залежи путем определения эффективного времени воздействия с различными периодами работы и накопления скважины, за счет деформаций в трещинной системе, позволит снизить процент обводнения скважин. В результате перераспределения по-

токов жидкости в пласте вовлекаются не выработанные участки за счет капиллярной пропитки.

Важным этапом при применении нестационарного воздействия является исследование оптических свойств нефти. Для оценки качества запасов вовлеченных в разработку необходимо применение оптических и хроматографических исследований

Хроматография — метод разделения, анализа и физико-химических исследований веществ, основанный на перемещении зоны вещества вдоль слоя сорбента в потоке подвижной фазы с многократным повторением сорбционных и десорбционных актов. При этом разделяемые вещества распределяются между двумя несмешивающимися фазами (в зависимости от их относительной растворимости в каждой фазе): подвижной и неподвижной [7]. Использование хроматографии позволяет определить содержание линейных алканов в исследуемых пробах нефти.

Наиболее чувствительны, достаточно быстро и точно определяемы интегральные параметры нефти — оптические характеристики, а именно, коэффициент светопоглощения ( $K_{\text{сп}}$ ) нефти. Спектрофотометрические методы анализа на протяжении нескольких десятилетий достаточно широко использовали в промышленной практике для решения ряда задач разработки нефтяных месторождений. Фотокolorиметры и спектрофотометры, работающие в видимой и ближней ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях светозлучения позволяют определить оптическую плотность — параметр, характеризующей способность вещества поглощать свет и затем получить пересчетный параметр. К настоящему моменту времени накоплен большой опыт применения этих методов для контроля процессов разработки нефтяных месторождений. Оптическим методам уделяется особое внимание в вопросах определения эффективности методов увеличения нефтеизвлечения. В качестве примера можно отметить такие работы как [8–15].

В лаборатории кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» АГНИ в период с октября 2016 г. по август 2017 г. проводились исследования проб добываемой нефти 303-й залежи Ромашкинского месторождения на хроматографе Shimadzu GC 2010 Plus и спектрофотометре Shimadzu UV-1800. Предварительно проведено центрифугирование при постоянной температуре 20 °С.

В таблицах 1—3 представлены результаты оптических исследований нефти на скважинах 303-й залежи Ромашкинского месторождения.

Таблица 1

**Значения коэффициента светопоглощения по скважинам 303-й залежи Ромашкинского месторождения: октябрь 2016 г.**  
**[Light absorption coefficient values for wells of the deposit 303 of the Romashkinskoye field (10.2016)]**

Длина волны, нм [Wavelength, nm]	Скважина				
	***46	***43	***73	***60	***55Г
	$K_{\text{сп}}, 1/\text{см}$				
385	11357,7	11491,15	11502,76	11470,84	11357,7
410	11598,49	11583,99	11589,79	11496,95	11598,49
540	7322,309	8227,444	7864,81	7183,058	7322,309

Таблица 2

**Значения коэффициента светопоглощения по скважинам 303-й залежи  
Ромашкинского месторождения: июль 2017 г.**  
[Light absorption coefficient values for wells of the deposit 303  
of the Romashkinskoye field (07.2017)]

Длина волны, нм [Wavelength, nm]	Скважина				
	***46	***43	***73	***60	***55Г
	$K_{\text{сп}}, 1/\text{см}$				
385	11386,71	11575,28	11546,27	11528,87	11549,17
410	11537,57	11604,29	11569,48	11581,09	11453,44
540	6176,385	6794,314	7911,227	7940,238	7632,724

Таблица 3

**Значения коэффициента светопоглощения по скважинам 303-й залежи  
Ромашкинского месторождения: август 2017 г.**  
[Light absorption coefficient values for wells of the deposit 303  
of the Romashkinskoye field (08.2017)]

Длина волны, нм [Wavelength, nm]	Скважина				
	***46	***43	***73	***60	***55Г
	$K_{\text{сп}}, 1/\text{см}$				
385	4664,926	4551,784	6031,332	4934,726	5375,689
410	4160,139	4052,8	5340,876	4398,027	4786,771
540	800,6963	954,4531	1041,485	832,6081	1163,33

В результате были получены следующие результаты:

- 1) состав добываемой нефти исследуемых скважин отличается незначительно;
- 2) после применения технологии (табл. 3) коэффициент светопоглощения уменьшается в несколько раз, что свидетельствует об увеличении коэффициента охвата пласта и улучшении качества продукции;
- 3) реакция скважин на применение нестационарного отбора различна: коэффициент светопоглощения добываемой нефти по скважине \*\*\*73 уменьшился в 1,9 раз, по скважине \*\*\*43 в 2,5 раза.

В таблицах 4–6 представлены результаты хроматографических исследований за период с октября 2016 г. по август 2017 г. на скважинах 303-й залежи Ромашкинского месторождения, по результатам которого было установлено:

- 1) по всем анализируемым скважинам максимум содержания линейных алканов изменяется в сторону более легких фракций;
- 2) по скважинам \*\*\*55Г, \*\*\*60 изменение максимальной концентрации линейных алканов зафиксировано по хроматографическим исследованиям в июле 2017 г., по скважинам \*\*\*73, \*\*\*43 и \*\*\*46 — в августе 2017 г.;
- 3) данные результаты подтверждают результаты оптических исследований и свидетельствуют об эффективности проводимого мероприятия.

Таблица 4

**Концентрация линейных алканов на скважинах 303-й залежи  
Ромашкинского месторождения: октябрь 2016 г.**  
[Linear alkanes concentration at wells of the deposit 303 of the Romashkinskoye field (10.2016)]

Линейные алканы [Linear alkanes]	Концентрация по скважинам [Concentration]				
	***55Г	***60	***73	***43	***46
C5	2,398525	1,07542	0,604265	1,695	0,22718

Окончание табл. 4

Линейные алканы [Linear alkanes]	Концентрация по скважинам [Concentration]				
	***55Г	***60	***73	***43	***46
C6	1,890065	0,52349	1,044135	1,654495	0,8025
C7	2,841745	1,288247	1,313355	2,39456	1,91946
C8	5,491575	4,009283	3,954715	4,619725	5,33922
C9	6,290275	5,80696	5,76342	5,51443	7,28411
C10	6,472565	6,69737	6,53934	6,141235	7,95264
C11	7,098505	7,635503	7,388445	7,012105	8,61328
C12	5,895725	6,474563	6,18825	5,92247	6,83732
C13	5,148945	5,838317	5,540615	5,19022	5,52318
C14	6,86935	8,011813	7,428655	7,397535	7,52682
C15	5,97898	6,472013	6,433925	6,03538	6,00185
C16	4,53429	4,907023	4,892055	5,29028	4,99331
C17	3,65475	4,072477	3,943545	3,762665	3,42143
C18	3,706315	4,170253	3,82799	3,733305	3,37987
C19	3,806625	4,218607	4,189855	3,97997	3,35893
C20	3,386295	3,668447	3,75132	3,55607	2,98593
C21	2,77241	2,971567	3,09983	2,9399	2,44976
C22	2,535895	2,642687	2,812415	2,711675	2,25861
C23	2,1623	2,252443	2,430695	2,32333	1,93738
C24	1,768805	1,803457	2,023015	1,907585	1,60969
C25	2,005705	2,021373	2,29032	2,15564	1,88793
C26	1,55706	1,45968	1,70919	1,63448	1,52146
C27	1,301915	1,175517	1,42702	1,323645	1,34791
C28	1,281775	1,043193	1,270025	1,278535	1,40738
C29	0,98968	0,767297	1,103945	0,957655	1,14888
C30	0,58352	0,439873	0,62571	0,54124	0,75199
C31	0,529175	0,58816	0,708455	0,7018	0,74907
C32	0,350525	0,383313	0,468075	0,447085	0,4409
C33	0,20025	0,198203	0,258465	0,25517	0,20891
C34	0,155025	0,161293	0,184575	0,1834	0,14178
C35	0,205565	0,253823	0,34138	0,25294	0,19106
C36	0,18468	0,181127	0,23621	0,19961	0,19848
C37	0,157935	0,161573	0,192585	0,18325	0,17694
C38	0,10088	0,08183	0,119875	0,122175	0,09659
C39	0,063465	0,042827	0,039345	0,024335	0,05556
C40	0,042615	0,081107	0,031545	0,026275	0,02511

Таблица 5

**Концентрация линейных алканов на скважинах 303-й залежи  
Ромашкинского месторождения: июль 2017 г.  
[Linear alkanes concentration at wells of the deposit 303 of the Romashkinskoye field (07.2017)]**

Линейные алканы [Linear alkanes]	Концентрация по скважинам [Concentration]				
	***55Г	***60	***73	***43	***46
C5	1,29133	10,91702	1,66597	0,37327	0,92044
C6	6,95113	6,57495	0,81560	0,21672	0,44198
C7	18,91217	13,71253	5,89832	5,16694	5,23109
C8	14,89222	11,40848	4,84621	6,14726	4,82899
C9	11,86014	9,81732	5,44710	6,93135	5,64044

Окончание табл. 5

Линейные алканы [Linear alkanes]	Концентрация по скважинам [Concentration]				
	***5Г	***60	***73	***43	***46
C10	7,95788	7,93107	5,65470	6,63591	5,95195
C11	6,15813	6,95973	6,29633	7,03610	6,69025
C12	4,02376	4,69062	5,23370	5,85779	5,60141
C13	3,27527	4,08004	5,08326	5,41927	5,26672
C14	3,88271	4,93812	7,91429	8,02806	7,86559
C15	2,50796	3,20473	4,85386	4,89742	5,24366
C16	2,72893	3,22944	5,34147	5,34817	5,42982
C17	0,88258	1,13891	2,07748	2,08667	2,41553
C18	1,61948	1,76627	3,70265	3,68807	3,84799
C19	1,78542	1,66662	3,91862	3,78978	3,98235
C20	1,51127	1,13465	3,46479	3,29667	3,48195
C21	1,08930	0,65414	2,82476	2,68476	2,83749
C22	0,94423	0,46895	2,69250	2,49207	2,66469
C23	0,76494	0,36735	2,33939	2,09240	2,23854
C24	0,57717	0,32477	1,96870	1,69741	1,84090
C25	0,53328	0,32982	1,95589	1,65056	1,79661
C26	0,44098	0,25507	1,70942	1,42233	1,61336
C27	0,44605	0,18081	1,36330	1,11613	1,32084
C28	0,37620	0,17837	1,28862	1,04148	1,27264
C29	0,27626	—	0,97397	0,77890	0,97554
C30	0,16102	—	0,55604	0,41695	0,56752
C31	0,15232	—	0,61351	0,50900	0,57185
C32	0,11827	—	0,40053	0,33694	0,37043
C33	0,13913	—	0,23424	0,14321	0,21693
C34	—	—	0,18316	0,15164	0,16410
C35	—	—	0,44242	0,34641	0,09853
C36	—	—	0,10170	0,05700	0,09297
C37	—	—	0,17753	0,11884	0,13012
C38	—	—	0,08781	0,06117	0,06689
C39	—	—	0,04640	0,03203	0,08495
C40	—	—	0,04792	0,26301	0,28886

Таблица 6

**Концентрация линейных алканов на скважинах 303-й залежи  
Ромашкинского месторождения: август 2017 г.  
[Linear alkanes concentration at wells of the deposit 303 of the Romashkinskoye field (08.2017)]**

Линейные алканы [Linear alkanes]	Концентрация по скважинам [Concentration]				
	***5Г	***60	***73	***43	***46
C5	—	—	—	—	—
C6	—	0,66028	0,36750	1,75730	0,56370
C7	2,23674	1,08337	1,52642	4,25763	1,42245
C8	24,26208	19,78441	18,80998	24,60159	27,77366
C9	13,48171	9,20603	10,43769	14,39752	11,99449
C10	6,16914	5,65361	5,13486	5,50514	5,96859
C11	3,79953	4,55310	4,18367	3,34282	4,04048
C12	3,18300	3,67776	2,89767	1,43121	3,47505
C13	5,24944	3,90836	5,71516	4,91225	3,87857

Линейные алканы [Linear alkanes]	Концентрация по скважинам [Concentration]				
	***5Г	***60	***73	***43	***46
C14	7,68164	5,46010	7,43504	6,28022	6,55156
C15	5,14725	4,07139	4,97726	4,03129	4,21341
C16	4,55401	5,50699	4,75387	3,94614	3,56259
C17	2,10496	1,54045	3,06103	2,52027	2,18405
C18	2,78490	2,68419	3,89440	3,20336	3,00588
C19	3,74228	3,43068	3,71228	3,06867	2,97594
C20	3,09629	3,11768	3,24654	2,49371	2,46252
C21	2,61441	2,44287	2,52807	2,02853	2,01779
C22	2,38837	2,39395	2,33915	1,86914	1,80800
C23	1,95859	2,03932	1,91578	1,51129	1,46838
C24	1,55380	1,64331	1,51056	1,16540	1,12124
C25	1,56500	1,70920	1,55742	1,17275	1,03457
C26	1,32752	1,25744	1,27367	0,97614	0,91559
C27	1,09934	1,29984	1,04208	—	0,75732
C28	—	1,76576	0,99414	—	0,73362
C29	—	1,51225	—	—	—
C30	—	0,96435	—	—	—
C31	—	0,93053	—	—	—
C32	—	0,56878	—	—	—

### Выводы

1. Хроматографические и оптические исследования свидетельствуют о первоначально схожем составе добываемой нефти до применения нестационарного отбора.

2. По результатам хроматографических и оптических исследований добываемой нефти можно судить об увеличении коэффициента охвата в результате применения нестационарного отбора жидкости на 303-й залежи.

3. Для детального анализа влияния технологических параметров нестационарного отбора жидкости подтверждения полученных выводов необходимо дополнить лабораторные исследования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Хамидулина А.Н., Яминова Л.Н.* Уточнение геологического строения и особенности разработки карбонатных отложений залежей 301—303 Ромашкинского месторождения // Нефтяное хозяйство. 2015. № 7. С. 30—33.
- [2] *Ибатуллин Р.Р., Низаев Р.Х., Евдокимов А.М.* Совершенствование системы разработки на основе моделирования карбонатных отложений залежи 302—303 Ромашкинского нефтяного месторождения // Сб. науч. тр. ТатНИПИнефть. 2012. № LXXX. С. 75—77.
- [3] *Хамидулина А.Н., Яминова Л.Н.* Особенности геологического строения и эксплуатации карбонатных коллекторов с высокой трещиноватостью // Нефтяное хозяйство. 2015. № 3. С. 47—52.
- [4] *Шайдуллин Р.Г., Гуськов Д.В.* Модель трещинообразования в карбонатном массиве 302, 303 залежей нефти Ромашкинского месторождения // Научный журнал «Георесурсы». 2006. № 4. С. 14—17.

- [5] *Хамидуллин М.М.* Повышение эффективности разработки сложнопостроенных карбонатных коллекторов (на примере разработки залежей 302—303 Ромашкинского месторождения): автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Бугульма, 2006. С. 6—21.
- [6] *Хисамов Р.С.* Проблемы выработки трудноизвлекаемых запасов нефти на поздней стадии разработки и инновационные технологии их решения // *Георесурсы.* 2012. № 3(45). С. 8—13.
- [7] *Царев Н.И., Царев В.И., Катраков И.Б.* Практическая газовая хроматография: учебно-метод. пособие для студентов хим. ф-та по спецкурсу «Газохроматографические методы анализа». Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2000. 156 с.
- [8] *Девликамов В.В., Мархасин И.Л., Бабалян Г.А.* Оптические методы контроля за разработкой нефтяных месторождений. М.: Недра, 1970. 160 с.
- [9] *Евдокимов И.Н., Лосев А.П.* Возможности оптических методов исследований в системах контроля разработки нефтяных месторождений: монография. М.: Изд-во «Нефть и газ», 2007. 228 с.
- [10] *Габдрахманов, А.Т., Гарипова Л.И., Леванова Е.В.* Обзор фотоколориметрических и спектрофотометрических исследований нефтей для решения геолого-промысловых задач // *Ученые записки Альметьевского гос. нефтяного ин-та.* Т. VII. 2009. С. 112—118.
- [11] *Фаррахов, И.М.* Методика лабораторных и статистических исследований оптических свойств высоковязкой нефти // *Ученые записки АГНИ.* 2010. Т. VIII. С. 9—16.
- [12] *Гуськова И.А., Габдрахманов А.Т.* Исследование влияния применения методов увеличения нефтеотдачи пластов на изменение свойств добываемой нефти // *Нефтяное хозяйство.* 2011. № 4. С. 101—103.
- [13] *Янаева О.В., Барская Е.Е., Ганеева Ю.М., Гуськова И.А., Габдрахманов А.Т., Юсупова Т.Н.* Анализ изменения состава и свойств добываемой нефти в результате проведения ГРП // *Вестник Казанского технологического университета.* 2014. Т. 17. № 3. С. 265—267.
- [14] *Янаева О.В., Барская Е.Е., Ганеева Ю.М., Охотникова Е.С., Гуськова И.А., Габдрахманов А.Т., Юсупова Т.Н.* Оценка действия гидроразрыва карбонатного пласта с закачкой кислото-содержащего реагента по изменению состава и свойств добываемой нефти // *Вестник Казанского технологического университета.* 2014. Т. 17. № 7. С. 263—265.
- [15] *Габдрахманов А.Т.* Контроль процессов воздействия на пласты с применением комплексного метода анализа спектров видимого оптического поглощения образцов добываемой нефти: дисс. ... канд. техн. наук. Бугульма, 2011.

© Гуськова И.А., Леванова Е.В., Белошапка И.Е., 2017

#### **История статьи:**

Дата поступления в редакцию: 10 декабря 2017

Дата принятия к печати: 14 января 2018

#### **Для цитирования:**

*Гуськова И.А., Леванова Е.В., Белошапка И.Е.* Анализ эффективности нестационарного отбора с использованием оптических и хроматографических методов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования.* 2018. Т. 19. № 1. С. 102—111. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-102-111

#### **Сведения об авторах:**

*Ирина Алексеевна Гуськова* — доктор технических наук, проректор по научной работе, зав. кафедрой, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Альметьевского государственного нефтяного института. *Область научных интересов:* научные разработки в области добычи нефти в осложненных условиях, проблем добычи трудноизвлекаемых запасов. *Контактная информация:* e-mail: guskovaagni1@rambler.ru

*Евгения Васильевна Леванова* — кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Альметьевского государственного нефтяного института. *Область научных интересов*: особенности применения методов увеличения нефтеизвлечения и обработки призабойной зоны пластов на поздней стадии разработки нефтяных месторождений. *Контактная информация*: e-mail: evgeniyalevanova@rambler.ru

*Белашапка Иван Евгеньевич* — аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Альметьевского государственного нефтяного института. *Область научных интересов*: повышение эффективности разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти, фильтрационные исследования. *Контактная информация*: e-mail: i.e.beloshapka@gmail.com

## **OPTICAL AND CHROMATOGRAPHIC METHODS FOR EFFICIENCY ANALYSIS OF NON-STATIONARY PRODUCTION**

**I.A. Guskova, E.V. Levanova, I.E. Beloshapka**

Almetyevsk State Oil Institute  
2, Lenina str., Almetyevsk, 423452, Tatarstan Republic, Russian Federation

The problem of cost-effective oil production from carbonate reservoirs becomes more and more important every year due to a decrease in oil reserves in terrigenous reservoirs. Oil extraction from carbonate reservoirs is always associated with the low filtration properties of the rock matrix and the dense fracture network presence. One of the most effective methods at this development stage for carbonate reservoirs is the non-stationary drainage technology. The development of non-stationary deposit drainage technology by determining the effective action time with different work periods and well accumulation, due to deformations in the fracture system, will allow reducing wells watering percentage. As a result of fluid flows redistribution in the formation, unprocessed areas are attracted by capillary impregnation. An important stage in the application of non-stationary action is the study of oil optical properties. To assess the quality of the reserves involved in the development, laboratory studies of the deposit non-stationary production efficiency of the Romashkinskoye oil field were carried out. The investigations were carried out using a spectrophotometer and a chromatograph. The influence of non-stationary selection on the wells operation dynamics and on the final ORC was determined.

**Key words:** non-stationary production, deposit 303, Romashkinskoye field, light absorption coefficient, chromatograph, spectrophotometer

### **REFERENCES**

- [1] Khamidullina A.N., Yaminova L.N. Geological structure refinement and special considerations for the development of carbonate reservoirs of the deposits 301–303 in the Romashkinskoye oil field. *Oil Industry*. 2015. No. 7. Pp. 30–33. (In Russ.).
- [2] Ibatullin R.R., Nizayev R.Kh., Evdokimov A.M. Sovershenstvovanie sistemy razrabotki na osnove modelirovaniya karbonatnykh otlozhenii zalezhi 302–303 Romashkinskogo neflyanogo mestorozhdeniya [Production system improvement based on the carbonate deposits modeling of the deposit 302-303 of the Romashkinskoye oil field]. TatNIPIneft scientific works collection. 2012. No. LXXX. Pp. 75–77. (In Russ.).

- [3] Khamidullina A.N., Yaminova L.N. Geological and production aspects of extensively fractured carbonate reservoirs. *Oil Industry*. 2015. No. 3. Pp. 47—52. (In Russ.).
- [4] Shaydullin R.G., Guskov D.V. Model' treshchinoobrazovaniya v karbonatnom massive 302, 303 zalezhi nefti Romashkinskogo mestorozhdeniya [Crack formation model in the carbonate massif deposit 302, 303 of the Romashkinskoye field]. *Scientific and technical journal "Georesursy"*. 2006. No. 4. Pp. 14—17. (In Russ.).
- [5] Khamidullin M.M. Povyshenie effektivnosti razrabotki slozhnopostroennykh karbonatnykh kollektorov (na primere razrabotki zalezhei 302—303 Romashkinskogo mestorozhdeniya) [Increase in the production efficiency of complexly built carbonate reservoirs (by example of the development of the deposits 302—303 of the Romashkinskoye field)]: author's abstract thesis (25.00.17) Hamidullin Marat Madarisovich; TatNIPIneft PC Tatneft. Bugulma, 2006. Pp. 6—21. (In Russ.).
- [6] Khisamov R.S. Production of oil reserves difficult to recover issues on the late stage of development and innovative technologies of their solution. *Georesursy*. 2012. № 3 (45). Pp. 8—13. (In Russ.).
- [7] Tsarev N.I., Tsarev V.I., Katrakov I.B. Prakticheskaya gazovaya khromatografiya [Practical gas chromatography]: Educational and methodological manual for students of the chemical faculty on a special course «Gas chromatography methods of analysis». Barnaul: Publishing house Alt. University Publ., 2000. 156 p. (In Russ.).
- [8] Devlikamov V.V., Marhasin I.L., Babalyan G.A. Opticheskie metody kontrolya za razrabotkoi neftnykh mestorozhdenii [Optical methods of control over the oil deposits production]. Moscow: Nedra Publ., 1970. 160 p. (In Russ.).
- [9] Evdokimov I.N., Losev A.P. Vozmozhnosti opticheskikh metodov issledovaniya v sistemakh kontrolya razrabotki neftnykh mestorozhdenii [Opportunities of optical research methods in control systems for the oil deposits development]: monograph. Moscow: Publishing house «OIL and GAS», 2007. 228 p. (In Russ.).
- [10] Gabdrakhmanov A.T., Garipova L.I., Levanova E.V. The review of photocolorimetric and spectrophotometric oil researches for the geological and field problems solution // *Almetyevsk State Oil Institute scientific notes*. Vol. VII. 2009. Pp. 112—118. (In Russ.).
- [11] Farrakhov I.M. Methods of laboratory and static researches of optical properties of high-viscosity oil // *ASOI scientific notes*. 2010. Vol. VIII. 2010. Pp. 9—16. (in Russ.).
- [12] Guskova I.A., Gabdrakhmanov A.T. Assessment of EOR methods' effect on oil properties. *Oil Industry*. 2011. No. 4. Pp. 101—103. (In Russ.).
- [13] Yanaeva O.V., Barskaya E.E., Ganeeva Y.M., Guskova I.A., Gabdrakhmanov A.T., Yusupova T.N. Analiz izmeneniya sostava i svoystv dobyvaemoi nefti v rezul'tate provedeniya GRP [Analysis of changes in the composition and properties of oil produced as a result of the hydraulic fracturing]. *Herald of Kazan Technological University*. 2014. 17(3). Pp. 265—267. (In Russ.).
- [14] Yanaeva O.V., Barskaya E.E., Ganeeva Y.M., Okhotnikova E.S., Guskova I.A., Gabdrakhmanov A.T., Yusupova T.N. Otsenka deistviya gidrorazryva karbonatnogo plasta s zakachkoi kislotosoderzhashchego reagenta po izmeneniyu sostava i svoystv dobyvaemoi nefti [Evaluation of the action of hydraulic fracturing of a carbonate formation with the acid-containing reagent injection to change the composition and properties of extracted oil]. *Herald of Kazan Technological University*. 2014. 17(7). Pp. 263—265. (In Russ.).
- [15] Gabdrakhmanov A.T. Kontrol' protsessov vozdeistviya na plasty s primeneniem kompleksnogo metoda analiza spektrov vidimogo opticheskogo pogloshcheniya obraztsov dobyvaemoi nefti [Control of the processes of impact on the seams using a complex method of analyzing the specters of visible optical absorption of extracted oil samples]. Thesis for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences (25.00.17) Gabdrakhmanov Artur Tagirovich; TatNIPIneft PC Tatneft. Bugulma, 2011. (In Russ.).

**Article history:**

Received: December 10, 2017

Accepted: January 14, 2018

**For citation:**

Guskova I.A., Levanova E.V., Beloshapka I.E. (2018). Optical and chromatographic methods for efficiency analysis of non-stationary production. *RUDN Journal of Engeneering Researches*, 19(1), 102–111. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-102-111

**Bio Note:**

*Irina A. Guskova* — Doctor of Technical Sciences, Scientific work chancellor, Head of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Almet'yevsk State Oil Institute. *Research interests:* Scientific developments in the field of oil production in complicated conditions, difficult reserves extraction problems. *Contact information:* e-mail: guskovaagni1@rambler.ru

*Evgeniya V. Levanova* — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor in the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Almet'yevsk State Oil Institute. *Research interests:* Special features about application of methods for increasing oil recovery and processing the bottomhole formation zone at the late stage of oil field development. *Contact information:* e-mail: evgeniyalevanova@rambler.ru

*Ivan E. Beloshapka* — post-graduate student in the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields, Almet'yevsk State Oil Institute. *Research interests:* Increasing efficiency of developing deposits with difficult oil reserves, filtration studies. *Contact information:* e-mail: i.e.beloshapka@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-112-118

УДК 551.2

## ПАЛЕОСТРУКТУРА ВОСТОЧНОГО ОРЕНБУРЖЬЯ

В.В. Дьяконов<sup>1</sup>, А.Е. Котельников<sup>2</sup>, Н.В. Жорж<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе  
Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов  
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

В статье изложены новые взгляды на структурные особенности Восточного Оренбуржья. Основанием написания статьи послужили результаты многолетнего исследования геологической партии кафедры месторождений полезных ископаемых и их разведки РУДН. В отличие от предшественников, рассматривавших данную территорию в качестве фрагмента сложно-складчатого Уральского сооружения, авторы статьи реализуют мысль о палеовулканическом строении территории. Проведя дешифрирования спектрозональных космических снимков, была получена схема тектонических нарушений, представляющая собой сочетание кольцевых и радиальных разломов. Эти нарушения подчеркивают крупную кольцевую структуру, центр которой располагается в районе озера Жетыколь. Проведенный палеофациальный анализ вулканогенных и осадочных пород показал, что на территории выделяются группы пород, отвечающих главным фациям вулканических сооружений — жерловая, склоновая и удаленная. Породы этих фаций сформировались в два самостоятельных тектоно-магматических цикла: байкальский — ордовикско-силурийского возраста, и каледонский — верхнедевон-верхнекаменноугольного возраста. Последовательность магматизма в обоих циклах гомодромная, и каждому циклу соответствуют свои интрузивные фации. Для байкальского цикла интрузивные внедрения представлены серпентинитами и апоультромафитами. Для каледонского цикла интрузивные породы представлены комплексными гранитоидными интрузиями трехфациального состава (начальные этапы внедрения представлены габбро и габбро-диоритами, вторая фаза внедрения — диоритами, сиенитами и гранодиоритами, третья фаза — разнообразными гранитами). Взаимодействие гранитоидов с серпентинитами приводит к ремобилизации дунитов из серпентинитов и формированию в последних хромитовой промышленной минерализации. Результаты исследований открывают новые возможности в анализе размещения и приуроченности известных эндогенных рудных объектов и прогнозирования новых.

**Ключевые слова:** Восточное Оренбуржье, тектонические циклы, палеовулканическое сооружение, фации, интрузивные комплексы

Восточная часть Оренбургской области состоит из трех административно-территориальных единиц: Адамовского, Светлинского и Ясененского районов. В дальнейшем мы будем называть территорию по озеру Жетыколь. По существующему тектоническому районированию здесь выделяют с запада на восток фрагменты трех крупных тектонических структур:

- Восточно-Уральского поднятия;
- Восточно-Уральского прогиба;
- Зауральского поднятия.

Такая трактовка тектонического районирования основана на представлениях об Урале, как самостоятельном, сложноскладчатом сооружении, протягивающимся узкой полосой (~300 км) с юга на север на пару тысяч километров. Возникновение структуры обязано мощному широтному сдавливанию.

Результаты многолетних собственных исследований Урала [1; 2], охвативших территории от Полярного Урала до Южных границ с Казахстаном, дают основание для несколько иного представления.

Во-первых, существующее мнение о сложноскладчатом строении Урала очень сильно преувеличено. В реальности, факты обоснования существования наложенной складчатости отсутствуют.

Во-вторых, данные бурения последних лет на территории Западной Сибири, однозначно говорят о том, что Уральский хребет представляет собой лишь незначительную часть огромной области палеозойской магматической активизации между Восточно-Европейской платформой на западе и Сибирской платформой на востоке. Временной интервал формирования области охватывает байкальскую, каледонскую и герцинскую эпохи тектогенеза.

В-третьих, на всем, более чем трехсотмиллионном, протяжении активной жизни области, происходило формирование крупных палеовулканических сооружений, сменяющих друг друга во времени и в пространстве.

Одно из таких сооружений откартировано нами в пределах Жетыкольской площади. Оно занимает территорию междуречья Тобола, Ыргыза и Кумака и геоморфологически представляет собой пологую возвышенность округлой формы, диаметром порядка 100 километров. Сооружение сильно эродировано, и значительные площади перекрыты современными рыхлыми отложениями. Основание структуры сложено вулканогенно-осадочными продуктами нижнепалеозойского (байкальского) магматизма (O—S). Ордовикские породы метабазальтов отнесенные к энбекшинскому комплексу (O<sub>2-3</sub>) и варненской толще (O<sub>2</sub>), представляют собой продукты начального этапа магматизма и относятся к реликтам склоновой фации. Вулканогенно-осадочные породы представлены маячной (O<sub>2</sub>) и кособродской (O<sub>2-3</sub>) свитами, могут быть отнесены к продуктам удаленной фации. На территории проявлены спорадически. Стратиграфически выше залегают вулканогенно-осадочные породы, датированные силурийским возрастом (булатовская толща и жиландытаусская свита). Для них характерно присутствие значительного количества кварцевой составляющей, что свидетельствует о присутствии более кислых продуктов эффузивного магматизма. Интрузивная составляющая этого этапа представлена серпентинитами киембаевской (O) серии, метагаббро-метадiorитами, амфиболитами крыклинского комплекса (O<sub>3</sub>) и мигматитами копинского комплекса (O<sub>3</sub>). По-видимому, стоит обратить внимание на Карашакольский и Аккаргино-Бурктальский комплексы апоультромафитов, серпентинитов. На сегодняшний день эти комплексы датированы как нижнедевонские, хотя существуют факты, свидетельствующие об их до девонском времени формирования.

Следующий, более молодой, цикл магматизма (каледонский), запечатлен в накоплении отложений, относимых к Кокпетинскому базальт-андезитовому комплексу (D<sub>1</sub>—D<sub>1-2</sub>), жетыкольской мета-базальтовой толще (D<sub>1</sub>) и существенно вулканогенно-осадочной кондыбаевской (D<sub>1</sub>). Выше располагаются контрастные

базальт — риолитовые журманкольская ( $D_2$ ), ащисуйская ( $D_3$ ) и березняковская ( $D_3-C_1$ ) толщи. Тогда как аккаргинская ( $C_1$ ) и кулыкольская ( $C_1$ ) толщи состоят из андезитов, дацитов, риолитов и их туфов.

Интрузивные образования этого тектономагматического цикла сформировались с позднего девона до ранне-каменноугольного. К ним относятся крупные гранитоидные массивы: Джабыгасайский ( $D_3$ ), Каскольский ( $D_3$ ), Барамбаевский ( $C_1$ ) и еще множество др. По составу, они, как правило, трехфазные. Ранние фазы внедрения это габбро, габбро-диориты, диориты. Вторая фаза — диориты, сиениты, гранодиориты. Третья — собственно гранитовая.

Таким образом, на рассматриваемой Жетыкольской площади четко выражены два последовательных цикла магматизма. Наиболее ранний — байкальский, представленный ордовикско-силурийскими вулканогенно-осадочными породами. Последовательность магматической деятельности гомодромная. К сожалению, восстановить палеовулканическое сооружение этого этапа не представляется возможным из-за фрагментарности выходов пород в пределах территории, но по всем признакам вулканическое сооружение сопоставимо с Медногорским [3]. В пользу этого свидетельствует состав интрузивной составляющей. Это массивы серпентинитов и апоультрамафитов. Интересно, что авторами были встречены факты ремобилизации дунитов из серпентинитов за счет инъекций кислых интрузий и приуроченности к ним хромитовой минерализации. Наиболее полно палеовулканическую реконструкцию удалось провести для каледонского этапа. По естественным обнажениям, с привлечением данных картировочного бурения, удалось диагностировать основные палеовулканические фации нижнедевон — верхнекаменноугольных пород.

Проведение палеовулканического реконструирования позволило построить карту-схему тектонических нарушений, на которой были выделены основные нарушения. Их можно разделить на две группы: кольцевые, расположенные в центре и на севере, охватывают большую часть площади района исследований, и линейные, которые носят радиальный характер. Пространственное расположения нарушений подчеркивает палеовулканическое сооружение (рисунок).

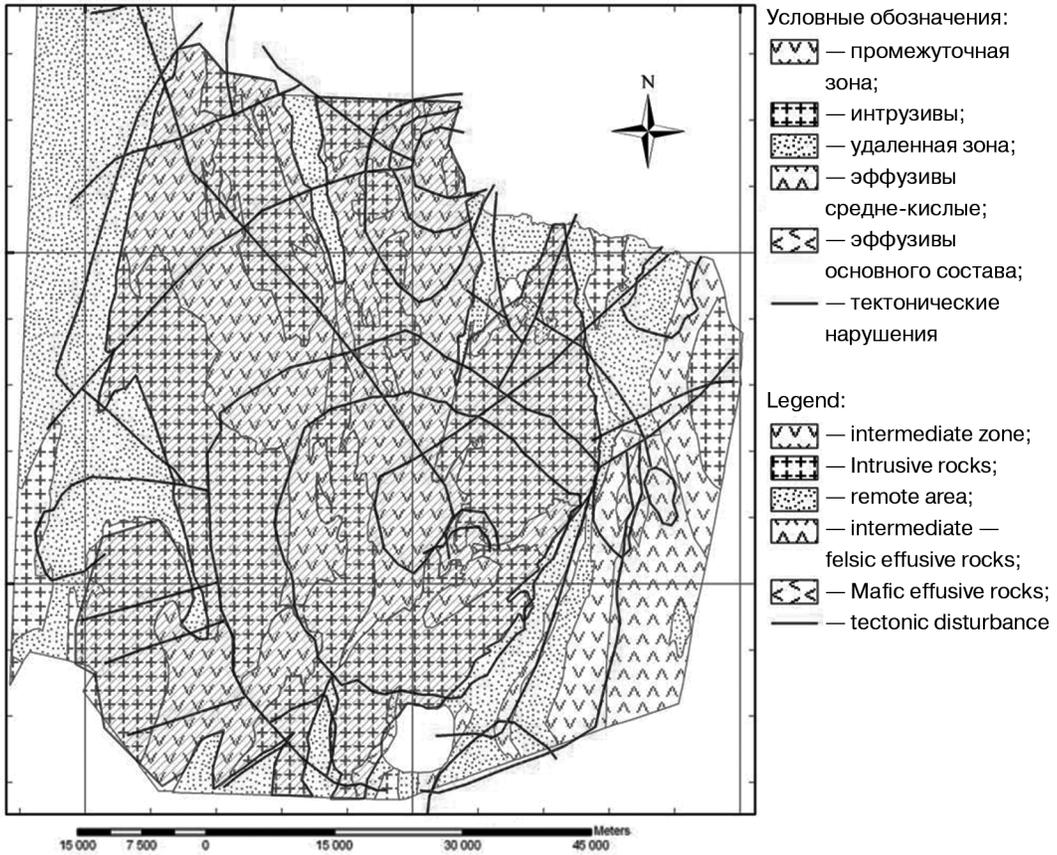
Палеофациальный анализ девон-каменноугольных пород в пределах изучаемой территории позволил установить следующее: существенно лавовые породы (метабазальты, лавы базальтов, риолитов и дацитов, зеленые сланцы по базальтам) концентрируются в пределах кольца диаметром 60 км, с центром — о. Жетыколь. По своему строению эти породы весьма близки к склоновой (промежуточной зоне) фации вулкана.

За пределами развития полей вулканических пород постепенно нарастает количество вулканогенно-осадочного материала (удаленная фация) — песчаники, сланцы, конгломераты, глинистые сланцы, туффиты, на расстоянии 80—100 км от о. Жетыколь.

К сожалению, в связи с плохой обнаженностью контуры магматического центра в районе о. Жетыколь достоверно выявить не удалось. По данным фондовых материалов, в картировочных скважинах на этом участке были обнаружены грубообломочные породы, которые можно отнести к жерловой фации. Поля их развития вписываются в контур вулканического центра, откартированного космодешифрированием.

**Восточная часть Оренбургской области**  
**[Eastern part of the Orenburg region]**

1:500 000



**Рис.** Карта-схема тектонических нарушений Восточного Оренбуржья  
**[Fig. A schematic map of tectonic disturbances of the East Orenburg region]**

Кольцевое строение района подтверждается результатами проведенного структурного анализа геологами АО «Компания вотемиро» [4].

Таким образом, можно сделать заключение, что в пределах Восточного Оренбуржья определяющей структурой является крупный палеовулкан центрального типа девон-каменноугольного времени. Этот палеовулкан перекрывает реликты другого палеовулкана, относящемуся к байкальскому тектоно-магматическому циклу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Котельников А.Е.* Медногорское палеовулканическое сооружение и перспективы его рудоносности: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2013. 24 с.
- [2] *Дьяконов В.В., Тряпцына А.С., Котельников А.Е.* Оценка перспективности по территории объекта «ГДП-200 листов М-41-І,ІІ, VII, VII, N-41-XX, XXVI, XXXI (Зауральская площадь, территория Российской Федерации)» на выявление медно-порфировой минерализации. Отчет по хозяйственной тематике. М.: РУДН, 2008. 118 с.

- [3] Дьяконов В.В., Котельников А.Е., Жорж Н.В. Научный анализ материалов по объекту ГМК-200 листов Q-41-XVI, XVII, XXI, XXII (Восточно-Войкарская площадь) и оценка перспектив рудоносности по результатам геохимических исследований. Отчет по хозяйственной тематике. М.: РУДН, 2009. 180 с.
- [4] Лисов А.С. «ГДП-200 листов М-41-I, II, VII, VIII, N-41-XX, XXVI, XXXI (Зауральская площадь, территория Российской Федерации)». Отчет Восточной геологосъемочной партии. Нежинка: АО «Компания вотемиро», 2008. 392 с.

©Дьяконов В.В., Котельников А.Е., Жорж Н.В., 2017

#### **История статьи:**

Дата поступления в редакцию: 01 октября 2017

Дата принятия к печати: 15 января 2018

#### **Для цитирования:**

Дьяконов В.В., Котельников А.Е., Жорж Н.В. Палеоструктура Восточного Оренбуржья // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 112–118. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-112-118

#### **Сведения об авторах:**

*Дьяконов Виктор Васильевич* — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой общей геологии и геокартирования института геологии минеральных ресурсов Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе. *Область научных интересов:* магматизм, тектоника, поиски твердых полезных ископаемых, палеовулканическая реконструкция. *Контактная информация:* e-mail: mdf.rudn@mail.ru

*Котельников Александр Евгеньевич* — кандидат геолого-минералогических наук, доцент департамента геологии, горного и нефтегазового дела инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* геохимия, геохимические поиски месторождений твердых полезных ископаемых, палеовулканическая реконструкция. *Контактная информация:* e-mail: kotelnikov\_ae@pfur.ru

*Жорж Наталья Владимировна* — старший преподаватель департамента геологии, горного и нефтегазового дела инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* геология, геохимия, поиски месторождений твердых полезных ископаемых. *Контактная информация:* zhorzh\_nv@pfur.ru

## **PALEOSTRUCTURE OF EAST ORENBURG REGION**

**V.V. Diakonov<sup>1</sup>, A.E. Kotelnikov<sup>2</sup>, N.V. Zhorzh<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Moscow State Geological Prospecting University  
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117997, Russian Federation

<sup>2</sup> Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

The article states new views on structural features of East Orenburg Oblast. Results of long-term research of geological party of Mineral Deposits and their Investigation Department in RUDN formed

the basis of writing the article. Unlike the predecessors considering this territory as a fragment of a double-fold structure of Ural, the authors of the article realize the thought of paleovolcanic structure of the territory. Having carried out photointerpretation of multiband satellite images, the scheme of tectonic disturbances, which is a combination of ring and radial faults, has been received. These disturbances emphasize the large ring structure, the center of which settles down near the Zhetykol lake. The carried-out facies analysis of volcanogenic and sedimentary rocks showed that groups of rocks corresponding to the main facies of volcanic constructions — vent, slope and distal — are outstanding for the territory. Rocks of these facies were formed in two independent tectono-magmatic cycles: the Baikal — Ordovician-Silurian age, and Caledonian — Upper Devonian-Upper Carboniferous age. The magmatism sequence is homodromous in both cycles and particular intrusive facies correspond to each cycle. For the Baikal cycle the intrusions are presented by serpentinite and ultramafite. For the Caledonian cycle the intrusive rocks are presented by complex granitoid intrusions of three-facies composition (the initial stages of intrusion are presented by gabbro and gabbro-diorites, the second phase of intrusion — by diorites, syenites and granodiorites, the third phase — by various granites). Interaction of granitoids with serpentinite leads to remobilization of dunite from serpentinite and to formation of chromite industrial mineralization in the latter. The research results open new opportunities in the analysis of allocation and confinedness of the known endogenous ore objects and predicting the new.

**Key words:** East Orenburg region, tectonic cycles, paleovolcanic structures, facies, intrusive complexes

## REFERENCES

- [1] Kotelnikov A.E. Mednogorskoe paleovulkanicheskoe sooruzhenie i perspektivy ego rudonosnosti [Mednogorsky paleovolcanic structure and prospects of its ore potential]. Abstract of dissertation for the degree of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences. M., 2013. 24 p. (In Russ.).
- [2] Diakonov V.V., Triapicyna A.S., Kotelnikov A.E. Otcenka perspektivnosti po territorii obekta “GDP-200 listov M-41-1,II,VII,VII, N-41-XX,XXVI,XXXI (Zauralskaia ploshchad, territoriia Rossiiskoi Federatsii)” na vyavlenie medno-porfirovoi mineralizatsii [Prospectivity assessment of the territory of object “GDP-200 of the sheets M-41-1,II,VII,VII, N-41-XX,XXVI,XXXI (Zauralskaya Square, territory of the Russian Federation)” on identification of a copper and porphyritic mineralization]. Report of contract subject. M.: PFUR Publ., 2008. (In Russ.).
- [3] Diakonov V.V., Kotelnikov A.E., Zhorzh N.V. Nauchnyi analiz materialov po obektu GMK-200 listov Q-41-XVI,XVII,XXI,XXII (Vostochno-Voikarskaia ploshchad) i otcenka perspektiv rudonosnosti po rezul'tatam geokhimicheskikh issledovaniy [The scientific analysis of materials on object of GMK-200 of the sheets Q-41-XVI,XVII,XXI,XXII (Vostochno-Voykarskaya Square) and assessment of prospects of mineralization by results of geochemical research]. Report of contract subject. M.: PFUR Publ., 2009. (In Russ.).
- [4] Lisov A.S. «GDP-200 listov M-41-I,II,VII,VIII, N-41-XX,XXVI,XXXI (Zauralskaia ploshchad, territoriia Rossiiskoi Federatsii)» [“GDP-200 of the sheets M-41-I,II,VII,VIII, N-41-XX,XXVI,XXXI (Zauralskaya Square, territory of the Russian Federation)”]. Report of East geological mapping party. Nezhinka: JSC “Company Votemiro”, 2008. (In Russ.).

### Article history:

Received: October 01, 2017

Accepted: January 15, 2018

### For citation:

Diakonov V.V., Kotelnikov A.E., Zhorzh N.V. (2018). Paleostucture of East Orenburg region. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(1), 112–118. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-112-118

**Bio Note:**

*Victor V. Diakonov* — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, professor, head of Department of General Geology and Geological Mapping at Institute of Geology of Mineral Resources, Russian State Geological Prospecting University n.a. Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RSGPU). *Research interests:* magmatism, tectonics, solid minerals exploration, paleovolcanic reconstruction. *Contact information:* e-mail: mdf.rudn@mail.ru

*Alexander E. Kotelnikov* — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, associate professor, Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests:* geochemistry, geochemical prospecting of solid mineral deposits, paleovolcanic reconstruction. *Contact information:* kotelnikov\_ae@pfur.ru

*Natalya V. Zhorzh* — senior lecturer of Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests:* geology, geochemistry, solid mineral deposits exploration. *Contact information:* e-mail: zhorzh\_nv@pfur.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-119-126

УДК 553.461

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗА МОРФОЛОГИИ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ХРОМИТОВЫХ ТЕЛ

В.Е. Марков<sup>1</sup>, Н.П. Васильев<sup>1</sup>, К.В. Карепина<sup>2</sup>, Е.В. Карелина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский университет дружбы народов

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

<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных  
и благородных металлов

*Российская Федерация, 117587, Москва, Варшавское шоссе, 129/1*

Дефицит хромитового сырья в России в настоящее время послужил толчком к использованию методов, ранее не использовавшихся при поисках и прогнозировании рудных тел. Хромитовые месторождения Урала характеризуются очень сложным строением. Для прогноза склонения рудных тел можно использовать наблюдающуюся связь между структурными элементами гипербазитов и преимущественной ориентировкой осей оптической индикатрисы оливина. В подавляющем большинстве случаев оси Ng индикатрисы статистически параллельны линейности хромшпинелида. Важным структурным элементом является линейность, которая представляет собой субпараллельные цепочки изометричных зерен хромшпинели или удлинённые зерна хромшпинели, ориентированные в одном направлении. Результаты проведенных работ по микроструктурному анализу вмещающих пород и измерению преимущественной ориентировки осей оптической индикатрисы оливина на Южнопогурейском рудопроявлении позволили авторам спрогнозировать склонение хромитовых рудных тел. Получены данные, помогающие предполагать склонение рудных тел, где есть дуниты, но не видна их полосчатость. Информация о пространственном положении и морфологии рудных тел крайне важна на этапе поисков слабоизученных рудопроявлений, и позволяет с максимальной достоверностью сделать вывод о целесообразности дальнейшего проведения геолого-разведочных работ, а также оптимально планировать разведочные работы.

**Ключевые слова:** хромиты, линейность хромшпинелида, оптическая индикатриса оливина, склонение рудных тел

В настоящее время на внутреннем рынке России сложилась острая ситуация, связанная с нехваткой хромосодержащего сырья. Дефицит в стране хромитовых месторождений обусловлен тем, что большинство из них осталось на территории республик бывших СССР. Те, которые остались на нашей территории имеют очень сложное строение, зачастую традиционные методы поисков хромитовых тел (геофизические, геохимические) малоинформативны.

Вместе с тем, выполняющиеся на хромитовых месторождениях исследования по изучению полосчатости, линейности и других структурных элементов позволяют сделать вывод о возможности применения этих данных для прогнозирования пространственного положения и морфологии рудных тел. На большинстве

известных месторождений отмечается, что оруденение образует линейно вытянутые зоны, приуроченные к осевым частям складок полосчатости; простираение рудных тел совпадает с простираением уплощенности пироксена, а склонение рудных тел параллельно линейности аксессуарных хромшпинелидов во вмещающих породах [1]. Это позволяет прогнозировать пространственное положение и отчасти морфологию рудных тел и помогает оптимально планировать разведочные работы.

В тех случаях, когда не удается макроскопически обнаружить внутреннюю структуру вмещающих пород в обнажениях, можно использовать часто наблюдающуюся связь между структурными элементами гипербазитов и преимущественной ориентировкой осей оптической индикатрисы оливина. В подавляющем большинстве случаев оси Ng индикатрисы статистически параллельны линейности хромшпинелида, а максимум осей Nr располагается нормально к уплощенности энстатита.

Эту закономерность подтверждают сделанные авторами замеры оптической индикатрисы оливина из образцов, отобранных вкрест простираения рудной зоны (ВИМС, 2010—2013 гг.) в районе рудопроявления Южнопогурейское на П.Урале.

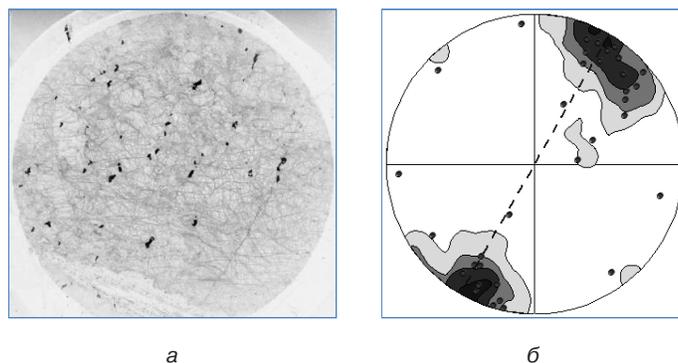
В общем плане геолого-тектоническая позиция Южнопогурейского хромитового рудопроявления определяется приуроченностью к западной границе Погурейского блока, расположенного в центральной части Войкаро-Сынинского ультраосновного массива. В разрезе блок представляет собой сложно построенную пластину мощностью 4—6 км, крутопадающую на юго-восток под углами 50—70°, сложенную чередованием гарцбургитов с различным содержанием линейных жилородных и неправильной формы дунитовых выделений мощностью от интервалов 30—40 см до 1,5—2,0 м, ориентированных в субмеридиональном направлении. Также пластина содержит вытянутые дунитовые тела длиной 250—300 м и шириной до пределов 25—180 м.

Из 100 образцов, отобранных по 3 профилям вкрест простираения рудной зоны, были выполнены ориентированные шлифы, по которым на федоровском столике производились измерения индикатрисы оливина. Исследования позволили сделать следующие выводы.

Практически важным структурным элементом является линейность, которая представляет собой субпараллельные цепочки изометричных зерен хромшпинели или удлинённые зерна хромшпинели, ориентированные в одном направлении (рис. 1, а). В 26 шлифах, где была видна линейная ориентировка аксессуарного хромшпинелида, след линейности параллелен простираению осей Ng оптической индикатрисы оливина (рис. 1, а, б).

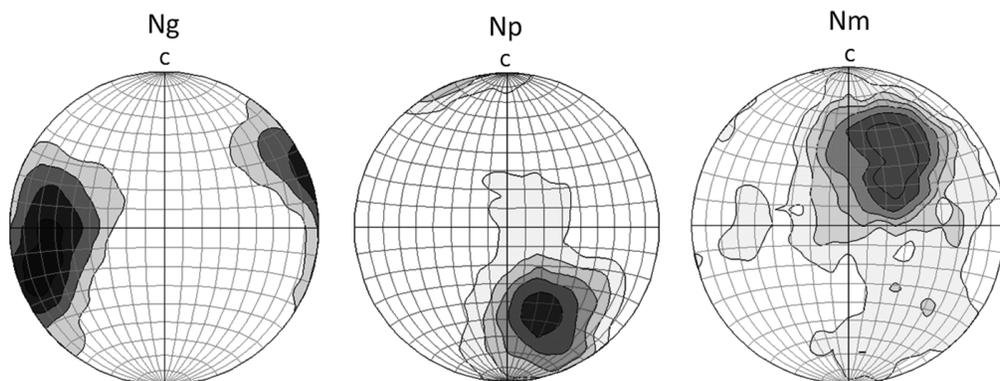
Истинное положение линейности, не может отклоняться от плоскости шлифа на большой угол (>15—20°), иначе ее не будет видно. Особенно это относится к агрегатной линейности. Поэтому можно считать, что, по меньшей мере, в этих шлифах, максимум осей Ng оливина совпадает с линейностью аксессуарного хромшпинелида.

В большинстве шлифов наблюдается хорошо выраженная преимущественная ориентировка осей оптической индикатрисы оливина (рис. 2). Оси Ng погружаются на В-СВ под углом ~30°, оси Nr на С-СВ под углом ~35° и оси Nm погружаются на ЮЗ под углом ~45°.



**Рис. 1.** Результаты исследования: а — агрегатная линейность хромшпинелида (черное) в шлифе (без анализатора); б — ориентировка осей Ng оптической индикатрисы оливина в проекции на плоскость шлифа

**[Fig. 1. a — aggregate linearity of chromspinelide (black) in thin section (without analyzer); б — orientation of the Ng axes of optical indicatrix of olivine projected on the plane of the section]**



**Рис. 2.** Генеральная ориентировка осей оптической индикатрисы оливина в пределах детально изученного участка

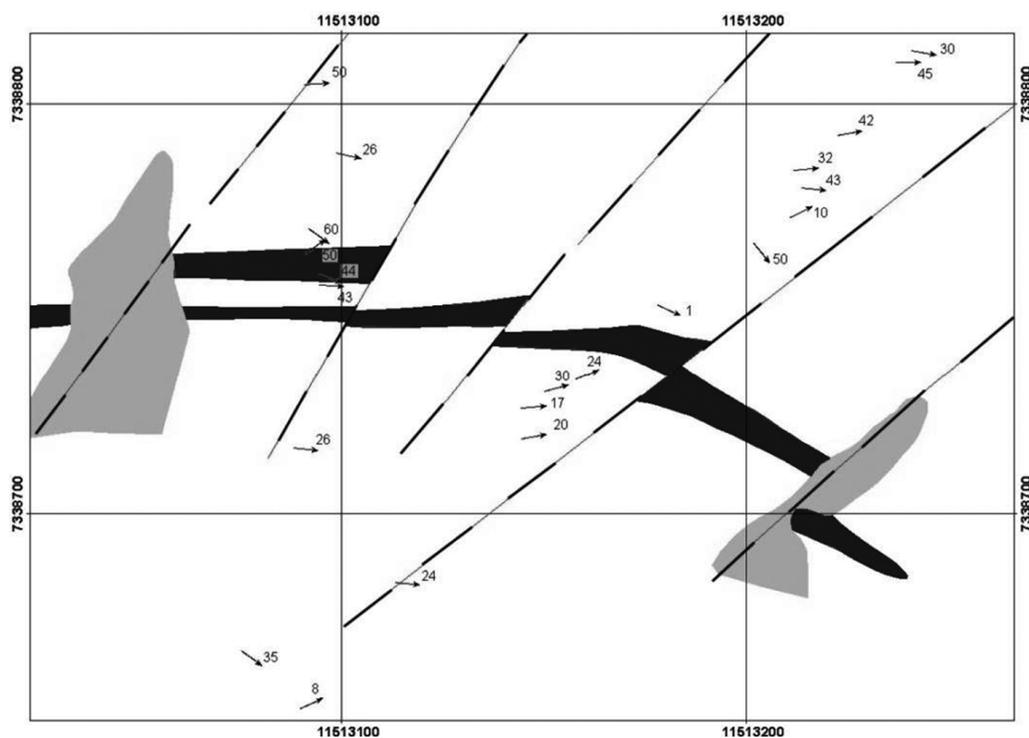
**[Fig. 2. General orientation of the axes of optical indicatrix of olivine within investigated area]**

Эта ориентировка или ее элементы характерны для большинства образцов (рис. 3).

Выявленную на участке работ преимущественную ориентировку осей оптической индикатрисы оливина можно объяснить результатом совместного проявления двух процессов: высокотемпературного пластического течения вещества посредством внутризернового трансляционного скольжения по системе плоскостей кристаллической решетки оливина  $\{0kl\}$  в направлении кристаллографической оси  $[100]$  и синтетонической перекристаллизацией.

Согласно экспериментальным исследованиям [3], система скольжения  $\{0kl\}[100]$  в оливине активна в диапазоне температур  $800\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$  при всестороннем давлении  $5\text{--}20\text{ кб}$  и низких скоростях деформации  $10^{-4}\text{--}10^{-6}\text{ сек}^{-1}$ . Теоретически, при деформации трансляционным скольжением по системе  $\{0kl\}[100]$ , оси Ng оливина стремятся занять положение вдоль направления твердопластического течения, а оси Nm и Np — образовать веер перпендикулярный к оси Ng. На микроструктурной диаграмме это выражается точечным максимумом Ng и нор-

мальным к нему поясом осей Nm-Np. При повышении температуры или уменьшении скорости деформации, преобладающей становится плоскость скольжения (010), а на микроструктурной диаграмме пояс Nm-Np сменяется точечными максимумами Nm и Np [4]. Именно эти 2 типа преимущественной ориентировки преобладают на Южнопогурейском участке. Наиболее совершенная ориентировка (четкие максимумы с высокой концентрацией, узкие, неразмазанные пояса) характерны для относительно крупнозернистых пород с преобладанием одинаковых по размеру зерен. В неравномернозернистых породах, содержащих наряду с крупными зернами оливина значительное (до 60%) количество мелких зерен, степень совершенства преимущественной ориентировки ухудшается. Участие внутризернового трансляционного скольжения по системе  $\{0kl\}[100]$  в создании преимущественной ориентировки осей оптической индикатрисы оливина проявляется не только характерным узором на микроструктурной диаграмме, но и образованием полос излома (kink-bands).



**Рис. 3.** Карта ориентировки линейности акцессорного хромшпинелида (определена по положению максимума осей Ng оливина; стрелки указывают направление погружения). Черное — хромитовые рудные тела; серое — аллювиальные отложения; пунктирная линия — разломы. Стрелками показаны направление погружения линейности хромшпинелида (цифра — угол погружения)

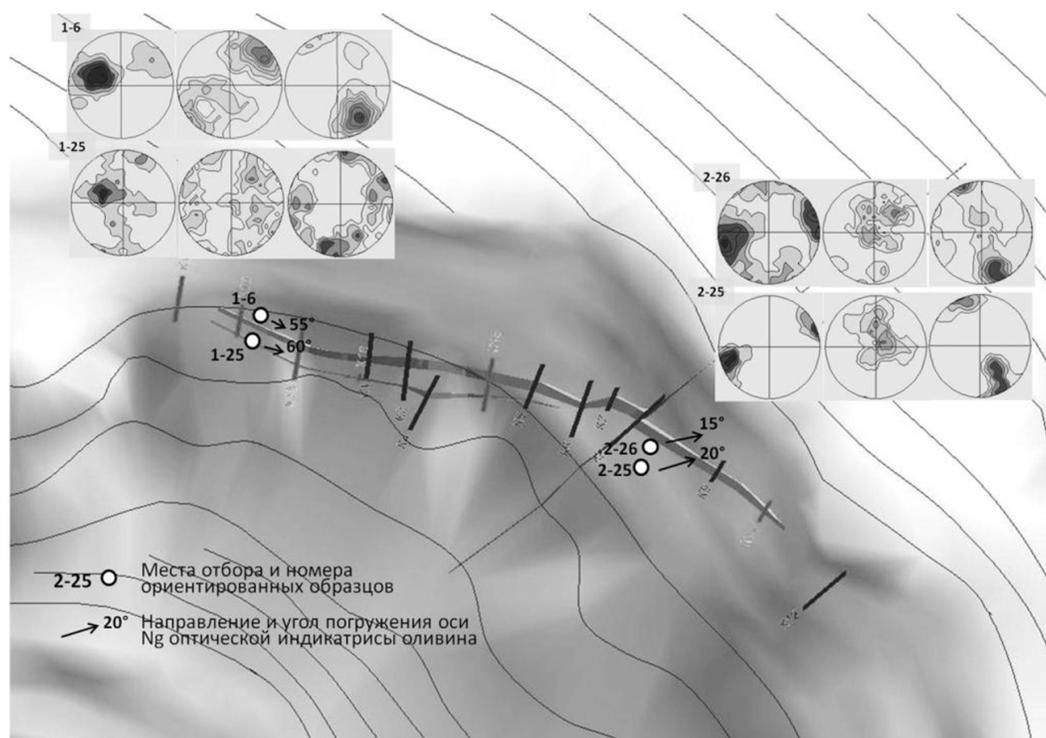
**[Fig. 3.** Map of linearity orientation of accessory chromspinelide (determined by the position of the maximum of Ng axes of olivine; arrows indicate direction of dip). Black — chromite ore bodies; grey — alluvial sediments; dotted line — faults. Arrows — the direction of dip of the linearity of chromspinelide (number — angle of dip)]

При синтетектонической перекристаллизации преимущественная ориентировка осей индикатрисы оливина контролируется полем напряжений, возникающем в породе под действием стресса. Оси Ng стремятся занять положение вдоль на-

правления растяжения, а оси  $N_r$  — нормально к направлению сжатия. Узор микроструктурных диаграмм зависит от соотношения величин напряжений по главным осям, изменяясь от 3-х точечных максимумов ( $N_g \parallel$  линейности,  $N_r \perp$  уплощенности) до неполных поясов, содержащих хорошо выраженные максимумы [3].

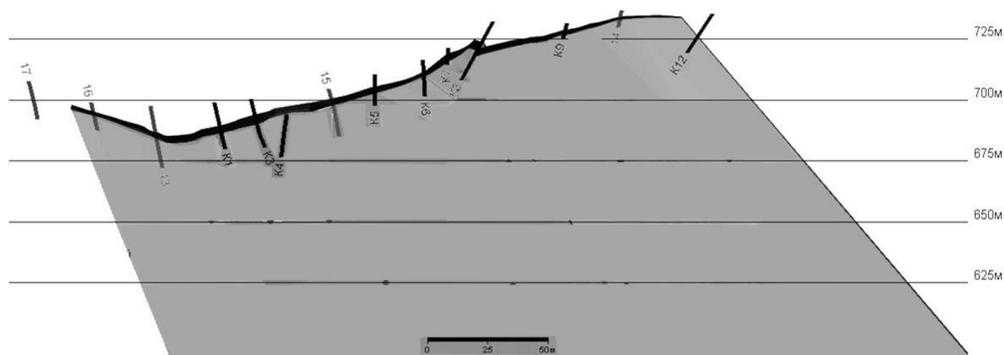
Несмотря на различие ориентирующих механизмов, почти всегда максимум осей  $N_g$  оптической индикатрисы оливина располагается по направлению пластического течения, параллелен линейности хромшпинелида и, при устойчивой ориентировке, может использоваться для прогноза склонения рудных тел. Оси  $N_r$  в подавляющем большинстве случаев располагаются перпендикулярно плоскости течения (по направлению сжатия) и могут использоваться для выявления скрытых плоскостных структур. Однако прямой связи между ориентировкой плоскостных структур и пространственным положением рудных тел не установлено.

По результатам микроструктурного анализа вмещающих пород и измерения преимущественной ориентировки осей оптической индикатрисы оливина на Южнопогурейском рудопроявлении авторами было спрогнозировано склонение рудных тел (рис. 4). Согласно нашим исследованиям, рудные тела склоняются на восток, юго-восток под углом  $55\text{--}60^\circ$  на западной стороне и под более пологим углом  $15\text{--}20^\circ$  на восточной стороне (рис. 4, 5).



**Рис. 4.** Результаты микроструктурного анализа вмещающих пород Южнопогурейского хромитового рудопроявления. Диаграммы преимущественной ориентировки осей оптической индикатрисы оливина (проекция на верхнюю полусферу). На рисунке — вскрытые канавами рудные тела.

**[Fig. 4.** Results of microstructural analysis of chromite ore enclosing rocks of Yujnopogureyskoe chromite deposit. Charts of the preferential orientation of axes of the optical indicatrix of olivine (projection on the upper hemisphere). On the figure — geological plan of ore bodies exploited by trenches]



**Рис. 5.** Склонение рудных тел Южнопогурейского рудопоявления в проекции на вертикальную плоскость, установленное по результатам микроструктурного анализа  
[**Fig. 5.** Dip of ore bodies of Yujinopogureyskoye deposit in projection to the vertical plane based on the results of microstructural analysis]

Эти данные помогают предполагать склонение рудных тел, где есть дуниты, но не видна их полосчатость. Информация о пространственном положении и морфологии рудных тел крайне важна на этапе поисков слабоизученных рудопоявлений и позволяет с максимальной достоверностью сделать вывод о целесообразности дальнейшего проведения геолого-разведочных работ, а также оптимально планировать разведочные работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Марков В.Е., Карелина Е.В., Эмси Гаррелл Денбре Шемрой. Структурная позиция хромитового оруденения на месторождении Центральное (Полярный Урал) // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2016. № 3. С. 41—52.
- [2] Савельев Д.Е. Соотношение структур рудоносной дунит-хромититовой ассоциации и перидотитов в офиолитах (на примере массивов Крака) // Литосфера. 2013. № 2. С. 76—91.
- [3] Щербаков С.А. Пластические деформации ультрабазитов офиолитовой ассоциации Урала. М.: Наука, 1990. 119 с.
- [4] Nicolas A., Poirier J.P. Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks // New York: Wiley-Interscience, 1976. 444 p.

©Марков В.Е., Васильев Н.П., Карепина К.В., Карелина Е.В., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: 01 декабря 2017

Дата принятия к публикации: 12 января 2018

#### Для цитирования:

Марков В.Е., Васильев Н.П., Карепина К.В., Карелина Е.В. Использование микроструктурного анализа для прогноза морфологии и пространственного расположения хромитовых тел // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 1. С. 119—126. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-119-126

#### Сведения об авторах:

Марков Владимир Евгеньевич — старший преподаватель департамента геологии, горного и нефтегазового дела инженерной академии Российского университета дружбы народов.

*Область научных интересов:* математическое моделирование геологических задач, инновационные методы дистанционного зондирования Земли, компьютерные технологии, геоинформационные технологии, структурные критерии локализации хромитовых месторождений. *Контактная информация:* e-mail: vemarkov@yandex.ru

*Васильев Николай Петрович* — студент-выпускник специалитета департамента геологии, горного и нефтегазового дела инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* литогеохимические поиски МПИ, математическое моделирование геологических задач, структурные критерии локализации хромитовых месторождений. *Контактная информация:* e-mail: rukolya@gmail.com

*Карепина Ксения Васильевна* — научный сотрудник Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов. *Область научных интересов:* геоинформационные технологии в геологии, поиски цветных и благородных металлов, микроструктурный анализ. *Контактная информация:* e-mail: ksusha55-89@mail.ru

*Карелина Елена Викторовна* — доцент департамента геологии, горного и нефтегазового дела инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* поиски и разведка месторождений полезных ископаемых, математическое моделирование геологических задач, месторождения благородных, черных и цветных металлов. *Контактная информация:* e-mail: elkarelina@mail.ru

## MICROSTRUCTURAL ANALYSIS FOR PREDICTING THE MORPHOLOGY AND SPATIAL ARRANGEMENT OF CHROMITE BODIES

V.E. Markov<sup>1</sup>, N.P. Vasiliev<sup>1</sup>, K.V. Karepina<sup>2</sup>, E.V. Karelina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

<sup>2</sup> Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals  
129, Varshavskoe sh., Bld. 1, Moscow, 117545, Russian Federation

Shortage of chromite raw materials in Russia at present time encouraged the use of methods, which have not been previously used in exploration and prediction of ore bodies. Chromite deposits of the Urals are characterized by a very complex structure. For prediction of the declination of ore bodies it is possible to use the observed relationship between the structural elements of ultrabasites and the preferential orientation of the axes of the optical indicatrix of olivine. In the majority of cases the Ng-axis of the indicatrix are parallel statistically to the linearity of chromespinelide. An important structural element is the linearity, which is presented by subparallel chains of isometric grains of chromespinelide or elongated grains of chromespinelide oriented in the same direction. The results of microstructural analysis of the enclosing rocks and measurements of the preferential orientation axes of the optical indicatrix of olivine on Yujnopogureyskoe deposit has allowed to predict the decline of the ore bodies. Information about the spatial position and morphology of the ore bodies allows effective planning of the exploration work.

**Key words:** chromite, chromespinelide linearity, optical indicatrix of olivine, decline of ore bodies

## REFERENCES

- [1] Markov V.E., Karelina E.V., McGarrell Denbre Shemroy. Structural position of chromite mineralization at the deposit Central (Polar Urals). *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2016. No. 3. P. 41—52 (in Russ.).
- [2] Saveliev D.E. The relationship between ore-bearing dunite association and peridotites in ophiolites (on an example of Kraka massifs, Southern Ural). *Lithosphere*. 2013. No. 2. P. 76—91. (in Russ.).
- [3] Scherbakov S.A. *Plasticheskie deformacii ul'trabazitov ofiolitovoj associacii Urala* [Plastic deformations of ultrabasites of the Urals ophiolitic assemblage]. Moscow: Science publ., 1990. 119 p. (in Russ.).
- [4] Nicolas A., Poirier J.P. *Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks* // New York: Wiley-Interscience, 1976. 444 p.

### Article history:

Received: December 01, 2017

Accepted: January 12, 2018

### For citation:

Markov V.E., Vasiliev N.P., Karepina K.V., Karelina E.V. (2018). Microstructural analysis for predicting the morphology and spatial arrangement of chromite bodies. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(1), 119—126. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-119-126

### Bio Note:

*Vladimir E. Markov* — senior lecturer at Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Scientific interests*: mathematical modeling of geological problems, innovative methods of remote sensing, computer technology, GIS technology, structural criteria for the localization of chromite deposits. *Contact information*: e-mail: vemarkov@yandex.ru

*Nikolay P. Vasilyev* — specialist graduate of the Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Scientific interests*: lithogeochemical exploration of mineral deposits, mathematical modeling of geological problems, structural criteria for the localization of chromite deposits. *Contact information*: e-mail: rukolya@gmail.com

*Ksenia V. Karepina* — scientific researcher of the Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals. *Scientific interests*: geo-information technologies in geology, prospecting for base and precious metals, microstructural analysis. *Contact information*: e-mail: ksusha55-89@mail.ru

*Elena V. Karelina* — assistant professor at the Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Scientific interests*: prospecting and exploration of mineral deposits, mathematical modeling of geological problems, deposits of precious, ferrous and non-ferrous metals. *Contact information*: e-mail: elkarelina@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-127-

УДК 550.8.056

## ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ НАНКАЙСКОГО ГАЗОГИДРАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В.П. Малюков, И.С. Токарев

Российский университет дружбы народов  
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Проведен анализ разработки первого в мире шельфового месторождения метановых гидратов Нанкай на восточном побережье Японии. Для разработки морского газогидратного месторождения Нанкай — высококонцентрированного месторождения гидратов, обнаруженного в турбидидных осадках в районе Восточного Нанкайского прогиба, выполнена сейсморазведка и разведочное бурение. После интенсивных исследований образцов керна и геофизических данных каротажа, полученных в предыдущих исследованиях, а также дополнительных инженерно-геологических работ, выбран объект разработки на северном склоне Daini Atsumi Knoll. При проведении первой в мире морской опытно-промышленной добычи метана из гидратов месторождения ниже морского дна, решались задачи: 1) определить дебит за короткий срок (от одной до нескольких недель), 2) достичь целостности скважин, пробуренных в рыхлых отложениях, 3) провести внедрение технологии мониторинга в целях сбора информации о состоянии гидрата метана при разработке. При проведении опытных работ по разработке газогидратного месторождения использовалось судно глубоководного бурения Chiku. Система управления водными ресурсами на корабле обрабатывает воду из продуктивного пласта, дегазатор удаляет растворенный метан, который сжигался в горелке, установленной на корме судна. Фильтры с гравийной набивкой уменьшают концентрацию взвешенных частиц, связанную с пескопроявлениями при воздействии на продуктивный пласт. Результаты 6-дневной стабильной разработки доказали, что диссоциация гидрата метана возможна в морских отложениях. Месторождения газовых гидратов в различных регионах мира самые большие по запасам. Актуальность проблемы связана с разработкой технологий и предотвращением осложнений.

**Ключевые слова:** месторождения газовых гидратов, депрессионный метод, геофизические исследования, таксоны археев и бактерий, размер решетки метановых гидратов, скважины

В марте 2013 г. был применен метод понижения давления (депрессионный метод) для разработки Нанкайского газогидратного месторождения на участке АТ1, расположенном на северном-западном склоне поднятия Daini-Atsumi в восточной части Нанкайской синклинали (рис. 1, 2) [3].

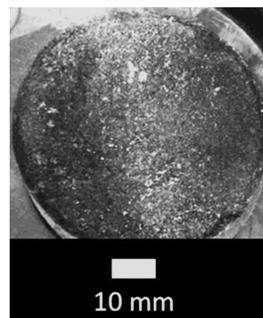
Эти исследования определили насыщенную газогидратную зону, мощностью 60 м на участке АТ1. Продуктивный горизонт сложен песками, но он делится на верхнюю и нижнюю часть илистым прослоем турбидитных отложений толщиной от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров.

Продуктивный пласт слоистый, в верхней части преобладают тонкие прослои, в то время как в нижней части преобладают более толстые прослои. Пропластки

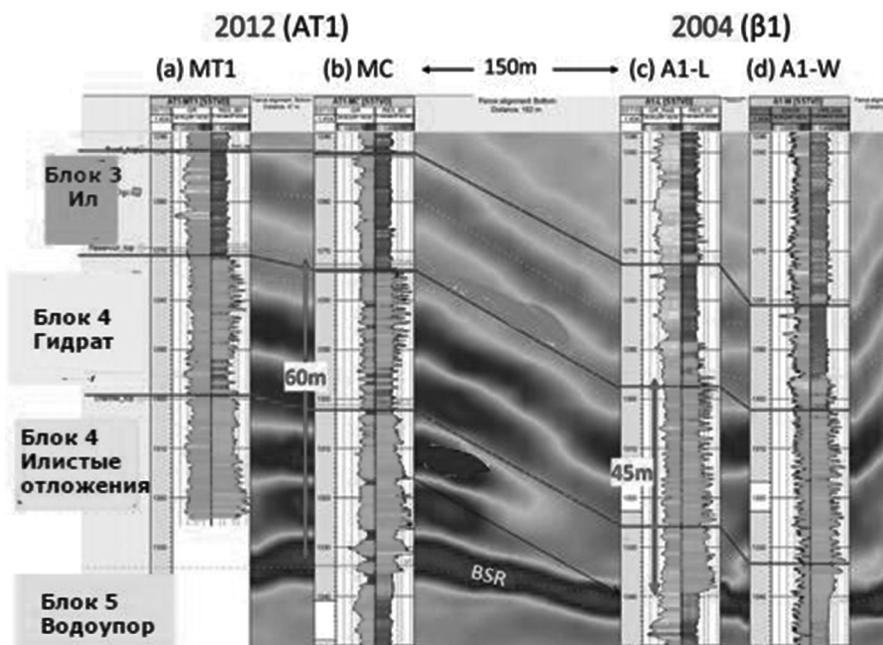
верхней части практически непрерывны, нижние пропластки — прерывистые. Обе продуктивные части имеют гидратонасыщенность равную 50—80%. Также следует учесть, что существуют два участка скважин  $\beta 1$  и АТ1 [3].



**Рис. 1.** Расположение Нанкайского газогидратного месторождения  
 [Fig. 1. Location of the Nankai gas hydrate field]



**Рис.2.** Образец керна газогидрата, со скважины АТ1-13Р [4]  
 [Fig. 2. Core sample of gas hydrate, from AT1-13P well [4]]



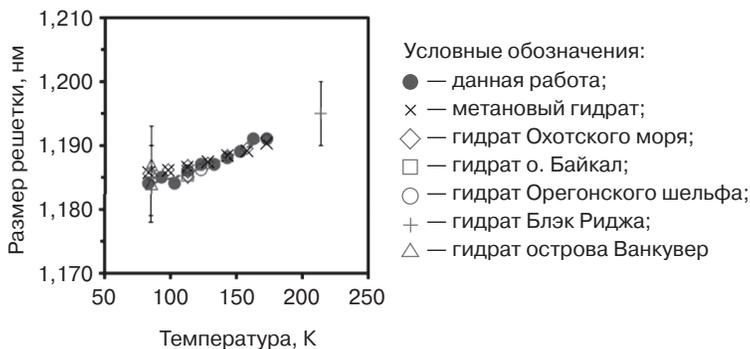
**Рис. 3.** Сравнение результатов геофизических исследований (каротажей) между участками АТ1 и  $\beta 1$  по скважинам АТ1МТ1, АТ1МС и  $\beta 1$ А1-Л,  $\beta 1$ А1-В [6]  
 [Fig. 3. Comparison of the results of geophysical studies (logging) between the sites АТ1 and  $\beta 1$  for wells АТ1МТ1, АТ1МС and  $\beta 1$ А1-Л,  $\beta 1$ А1-В [6]]

В результате проведенных геофизических работ было выяснено, что продуктивный пласт ограничен экранами (рис. 3) [6]. Экранирующий верхний пласт толщиной 20 м сложен турбидитными отложениями и имеет общую границу с кровлей продуктивного горизонта. Нижний экран (водоупор) отделяет газогидратный пласт от водонасыщенного песчаного пласта, поэтому скважины бурятся на 20 м выше подошвы продуктивного горизонта [6].

### Углеводородная и кристаллографическая характеристики газогидратов, извлеченных из восточной части АТ1 Нанкайской синклинали

Основной компонент гидрата — метан, но также присутствуют и более тяжелые углеводороды (0,03%). Газ распределен в разных прослоях по-разному.

Молекулярный и изотропный анализ показал, что газ имеет биогенное микробиологическое происхождение. В ходе исследования установлено, что молекулы заключены в структуру первого типа с числом гидратации 6,1. Кристаллический тип кристалла величиной 1,1841 нм при температуре 83 К (рис. 4). Полученные параметры решетки кристалла достаточно близки соответствующим параметром газовых гидратов из других регионов и в том числе искусственно образованным. Плотность гидратных кристаллов в гидратонасыщенных образцах при температуре 83 К составляет  $950 \text{ кг/м}^3$  [4].



**Рис. 4.** Сравнение образцов кристаллов гидратов с различных объектов, включая искусственно образованный образец

[Fig. 4. Comparisons of the hydrate crystals samples, including artificially formed hydrate]

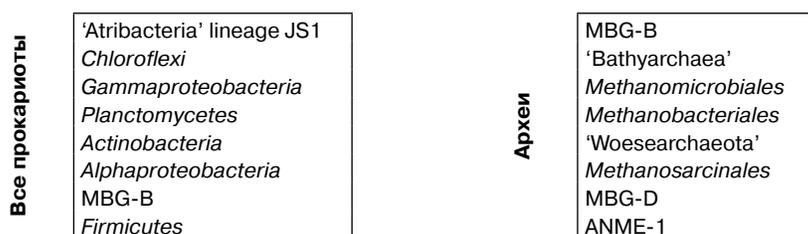
Как и на многих газогидратных месторождениях, в особенности биогенного типа [1], на Нанкайском месторождении отбирались пробы керна для изучения микроорганизмов.

Для изучения микроорганизмов, отбирали керн со скважин АТ1-СТ1 и участка АТ1. Изучалась центральная часть керна, чтобы избежать влияния других бактерий, в особенности бактерий типа SAR 11. Для исследований использовалось два метода геномных секвестирований: 16S р-РНК и mcrA.

В каждом гидратосодержащем прослое керна было найдено от 7 до 94% археев (археи — домен живых организмов. Археи представляют собой одноклеточные микроорганизмы, не имеющие ядра, а также каких-либо мембранных органелл) от всех прокариотов (прокариоты — одноклеточные живые организмы, не обла-

дающие оформленным клеточным ядром и другими внутренними мембранными органоидами), оставшиеся проценты — бактерии. Геномное совпадение археев и бактерий в рассмотренном случае от 3 до 50%.

Археи представлены таксонами (таксон — группа в классификации, состоящая из дискретных объектов, объединяемых на основании общих свойств и признаков): ANME-1a, ANME-1b и ANME-3. Также присутствуют таксоны археев: Methanomicrobiales, Methanobacteriales, Methanoparcihales. Бактерии представлены таксоном Chloroflexi (рис. 5). Вторые три типа археев в результате жизнедеятельности производят метан, а первые три типа археев перерабатывают часть метана в углекислый газ [5].



**Рис. 5.** Различные таксоны археев и бактерий, находящихся в гидратах  
[Fig. 5. Various taxa of archaea and bacteria found in hydrates]

В соответствии с японскими научно-исследовательскими программами, исследования газогидратов (нетрадиционный ресурс природного газа) были проведены как на суше (месторождение Маллик, Канада) так и на море (Накайская низменность) [2].

Работы проводили на месторождение Маллик в 2007—2008 годах где компания JOGMEC и министерство природных ресурсов Канады, работая вместе, показали, что непрерывный и значительный поток газа стал возможным при применении депрессионного метода воздействия на газогидраты в природных условиях. В результате проведения работ в 2008 году был достигнут в течении 6-ти дней поток газа с дебитом 2000—4000 м<sup>3</sup>/сут из 12-метрового интервала продуктивного пласта.

Следующей целью программы была разработка морского газогидратного месторождения Нанкай — высококонцентрированное месторождение гидратов, обнаруженное в турбидидных осадках в районе Восточного Нанкайского прогиба сейсморазведкой и разведочным бурением в 2004 году. После интенсивных исследований образцов керна и геофизических данных каротажа, полученных в предыдущих исследованиях, а также дополнительных инженерно-геологических работ, проведенных в 2011 году, был выбран объект разработки на северном склоне Daini Atsumi Knoll.

При проведении первой в мире морской опытно-промышленной добычи метана из гидратов месторождения ниже морского дна, решались основные задачи: 1) определить дебит за короткий срок (от одного до нескольких недель), 2) достичь стабильности, целостности скважин, пробуренных в рыхлых отложениях, 3) провести внедрение технологии мониторинга в целях сбора информации о состоянии гидрата метана при разработке.

Для производственных испытаний компания JOGMEC планировала и курировала программу. Japan Petroleum Exploration Co. Ltd. Jepses выступал в качестве оператора реализации операции на месторождении, включая бурение и разработку [3].

**Характеристика объекта газогидратного месторождения.** 30 скважин, включая горизонтальные, были пробурены в 16 местах с проведением геофизических исследований и отбором керна (рис. 6).

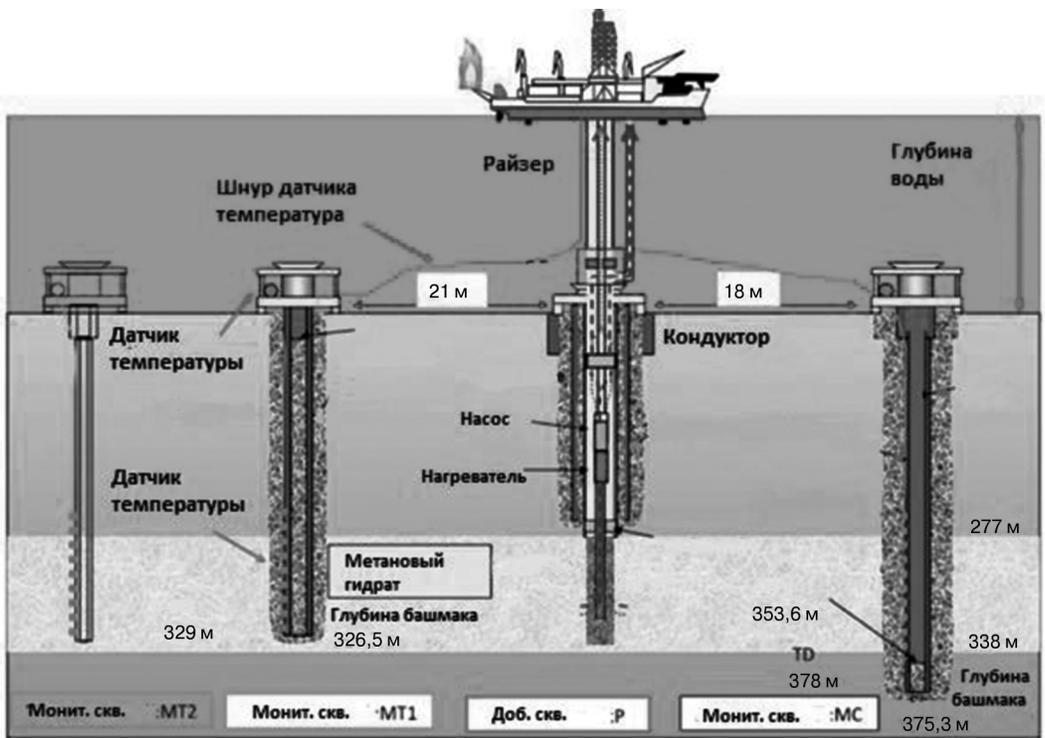


Рис. 6. Схема скважин при проведении первых испытаний [3]  
[Fig. 6. Well scheme for the first tests [3]]

В районе проведения работ глубина воды составляет около 1000 м. Интервал насыщенного гидрата метана около 60 м находится в 300 м ниже морского дна.

В то же время, устройства зондирования температуры были установлены в наблюдательных скважинах для долгосрочных измерений и диагностики диссоциации гидрата и потока тепла в пластах.

Наряду с программой сбора данных в буровых скважинах, был установлен сейсмометр на дне моря. Кроме того, были установлены датчики утечки метана и датчики деформации поверхности (измеритель наклона и датчики давления высокой точности) на морском дне для исследований воздействия разработки на окружающую среду и деформацию рельефа морского дна.

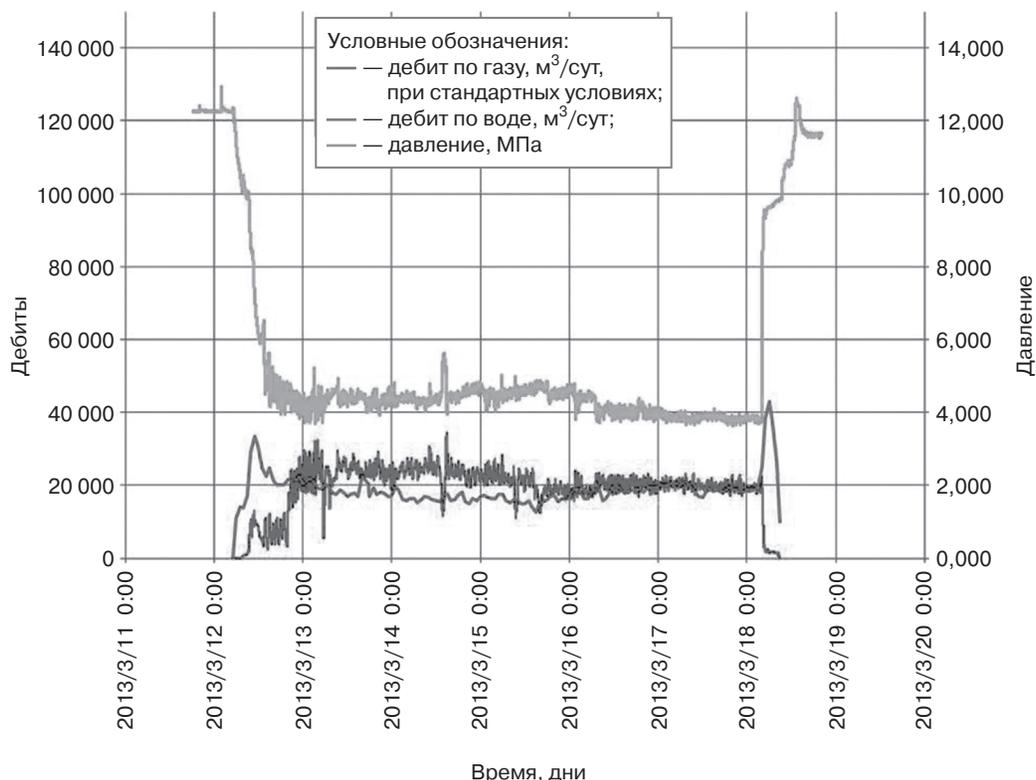
При проведении опытных работ по разработке газогидратного месторождения использовалось судно глубоководного бурения Chiku, оборудованного горелкой (рис. 7). Система управления водными ресурсами на корабле обрабатывает воду из продуктивного пласта, дегазатор удаляет растворенный метан, который жи-

гался в горелке, установленной на корме судна. Фильтры с гравийной набивкой уменьшают концентрацию взвешенных частиц, связанную с пескопроявлениями при воздействии на продуктивный пласт [3].



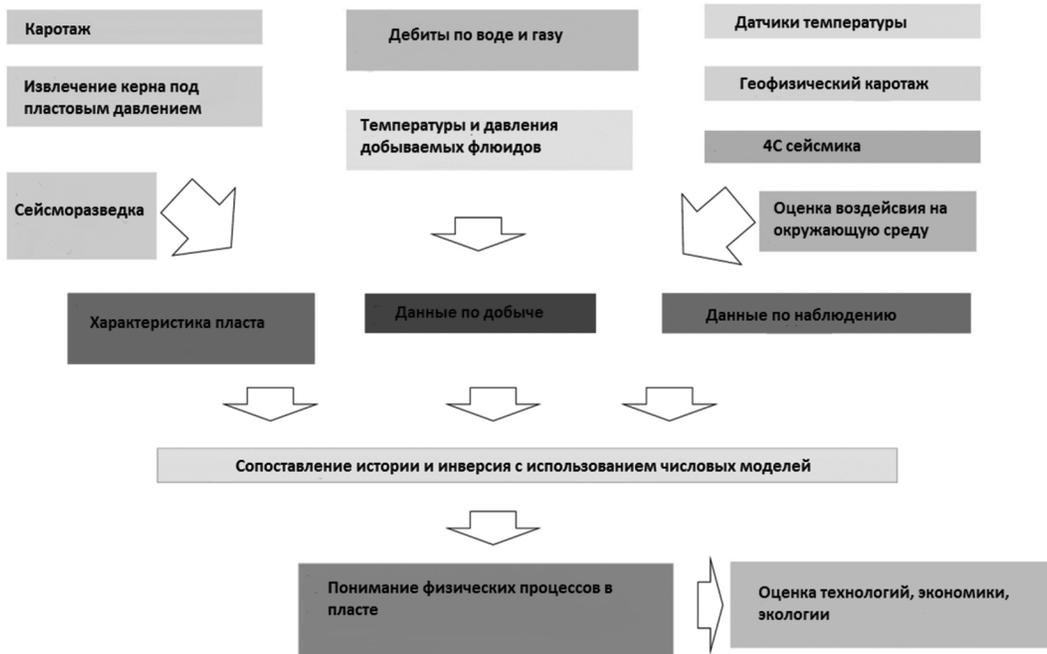
**Рис. 7.** Горелка на корабле Chikyu [3]  
**[Fig. 7.** Chikyu's flare [3]

**Результаты проведенной работы.** Утром на 6-й день, наблюдалось внезапное увеличение дебита воды с последующим сильным выносом песка на поверхность добыча газа была прекращена (рис. 8).



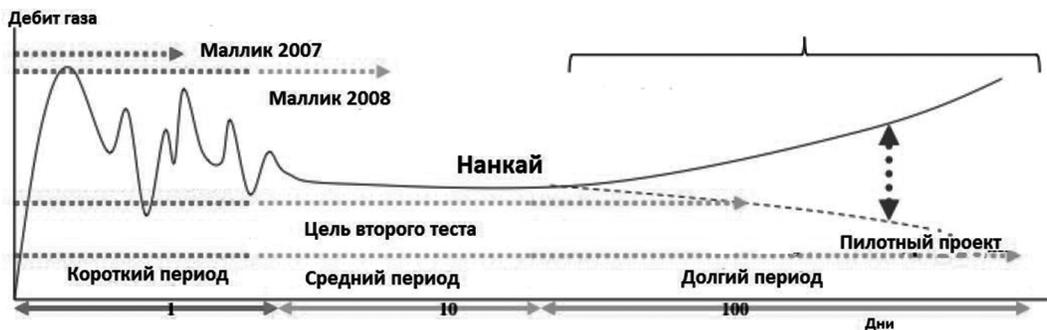
**Рис. 8.** Динамика забойных давлений, дебитов воды и газа во время теста  
**[Fig. 8.** Forecasted dynamics of bottomhole pressures, water and gas rates]

Результаты 6-дневной стабильной разработки доказали, что диссоциация гидрата метана возможна в морских отложениях. Скорость потока газа была больше, чем ожидалось, это объясняется новой информацией по характеристике коллектора (рис. 9).



**Рис. 9.** Процесс анализа полученных данных с продуктивного участка  
**[Fig. 9.** The process of analyzing the obtained data from the productive site]

В результате проведения и анализа результатов опытно-промышленных работ по освоению первого в мире газогидратного месторождения на шельфе японскими специалистами представлена прогнозируемая добыча газа за различные интервалы времени (рис. 10).



**Рис. 10.** Прогнозируемая добыча газа за короткий, средний и продолжительный промежутки времени  
**[Fig. 10.** The forecasted gas production for different periods of time]

Долгосрочное проведение работ по извлечению газа из газовых гидратов на месторождении Нанкай не наблюдалось в связи с досрочным прекращением операции, связанное с проблемой пескопроявлений [3].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Трофимук А.А., Черский Н.В., Васильев В.Г., Макогон Ю.Ф., Требин Ф.А. Научное открытие СССР № 75 «Свойство природных газов в определенных термодинамических условиях находится в земной коре в твердом состоянии, и образовывать газогидратные залежи» // Открытия, изобретения, товарные знаки. 1970. № 10.
- [2] Воробьев А.Е., Малюков В.П. Инновационные технологии освоения месторождений газовых гидратов: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. М.: РУДН, 2009. 289 с.
- [3] Yamamoto K., Terao Y., Fujii T., Ikawa T., Seki M., Matsuzawa M., Kanno T. (2014) Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough. 2014 Offshore Technology Conference, Houston, TX, May 5–8.
- [4] Masato Kida, Yusuke Jin, Mizuho Watanabe, Yoshihiro Konno, Jun Yoneda, Kosuke Egawa, Takuma Ito, Yoshihiro Nakatsuka, Kiyofumi Suzuki, Tetsuya Fujii, Jiro Nagao. Chemical and crystallographic characterizations of natural gas hydrates recovered from a production test site in the eastern Nankai Trough. *Marine and Petroleum Geology* 66. March 2015.
- [5] Taiki Katayama, Hideyoshi Yoshioka, Hiroshi A. Takahashi, Miki Amo, Tetsuya Fujii and Susumu Sakata. Changes in microbial communities associated with gas hydrates in seafloor sediments from the Nankai Trough. *FEMS Microbiology Ecology Advance Access* published May 10, 2016.
- [6] Tetsuya Fujii, Kiyofumi Suzuki, Tokujiro Takayama, Machiko Tamaki, Yuhei Komatsu, Yoshihiro Konno, Jun Yoneda, Koji Yamamoto, Jiro Nagao. Geological setting and characterization of a methane hydrate reservoir distributed at the first offshore production test site on the DainiAtsumi Knoll in the eastern Nankai Trough, Japan. *Marine and Petroleum Geology* 146. March 2015.

© Малюков В.П., Токарев И.С., 2017

### История статьи:

Дата поступления в редакцию: 03 октября 2017

Дата принятия к печати: 14 января 2018

### Для цитирования:

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. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-127-136

### Сведения об авторах:

Малюков Валерий Павлович — кандидат технических наук, доцент департамента геологии, горного и нефтегазового дела инженерной академии Российского университета дружбы народов. *Область научных интересов:* инновационные технологии в нефтегазовой отрасли, газовые гидраты, нанотехнологии в нефтегазовой отрасли, подземное резервирование углеводородов. *Контактная информация:* e-mail: v.malyukov@mail.ru

Токарев Иван Сергеевич — магистрант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений Российского государственного университета нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина. *Область научных интересов:* газовые гидраты, физика пласта, скважинная добыча углеводородов. *Контактная информация:* e-mail: RedFriendlyAnt@gmail.com

## RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF THE NANKAI GAS HYDRATES FIELD

V.P. Malukov, I.S. Tokarev

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)  
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

The analysis of the development of the world's first shelf field of methane hydrates on the east coast of Japan was carried out. To develop the marine Nankai gas hydrate deposit, a highly concentrated hydrate deposit discovered in turbidite sediments in the Nankai East Trough area, seismic exploration and exploratory drilling were performed. After intensive study of core samples and geophysical logging data obtained in previous studies, as well as additional engineering and geological studies, a development site was selected on the northern slope of Daini Atsumi Knoll. There were a number of goals: 1) to determine the production rate in a short period (from one to several weeks), 2) to achieve stability, integrity of wells drilled in loose sediments, 3) to implement monitoring technology to collect information on the state of methane hydrate during development. During the experimental work on the development of the gas hydrate deposit, the deep-water drilling vessel Chikyu was used. The water management system on the ship processed water from the reservoir, the degasser had removed dissolved methane, which was burned in the installed burner on the stern of the ship. Filters with gravel packing reduced the concentration of suspended particles associated with sand ingress when affected by a productive formation. The results of the 6-day stable development proved that the dissociation of methane hydrate is possible in marine sediments.

**Key words:** gas hydrate deposits, depressive method, geophysical studies, Archean and bacterial taxa, size of methane hydrate lattice, wells

### REFERENCES

- [1] Trofimuk A.A., Chersky N.V., Vasiliev V.G., Makogon Yu.F., Trebin F.A. Nauchnoe otkrytie SSSR № 75 «Svoistvo prirodnykh gazov v opredelennykh termodinamicheskikh usloviyakh nakhoditsya v zemnoi kore v tverdom sostoyanii, i obrazovyyvat' gazogidratnye zalezhi» [Scientific discovery of the USSR № 75 "The property of natural gases in certain thermodynamic conditions to lie in the earth's crust in a solid state and form gas-hydrate deposits"]. Otkrytiya, izobreteniya, tovarnye znaki. 1970. No. 10. (In Russ.).
- [2] Vorobev A.E., Malyukov V.P. Innovatsionnye tekhnologii osvoeniya mestorozhdenii gazovykh gidratov [Innovative technologies for the development of gas hydrates]: Textbook. 2-nd edition. Moscow: PFUR Publ., 2009. 289 p. (In Russ.).
- [3] Yamamoto K., Terao Y., Fujii T., Ikawa T., Seki M., Matsuzawa M., Kanno T. (2014) Operational overview of the first offshore production test of methane hydrates in the Eastern Nankai Trough. 2014 Offshore Technology Conference, Houston, TX, May 5—8.
- [4] Masato Kida, Yusuke Jin, Mizuho Watanabe, Yoshihiro Konno, Jun Yoneda, Kosuke Egawa, Takuma Ito, Yoshihiro Nakatsuka, Kiyofumi Suzuki, Tetsuya Fujii, Jiro Nagao. Chemical and crystallographic characterizations of natural gas hydrates recovered from a production test site in the eastern Nankai Trough. *Marine and Petroleum Geology* 66. March 2015.
- [5] Taiki Katayama, Hideyoshi Yoshioka, Hiroshi A. Takahashi, Miki Amo, Tetsuya Fujii and Susumu Sakata. Changes in microbial communities associated with gas hydrates in seafloor sediments from the Nankai Trough. *FEMS Microbiology Ecology Advance Access* published May 10, 2016.
- [6] Tetsuya Fujii, Kiyofumi Suzuki, Tokujiro Takayama, Machiko Tamaki, Yuhei Komatsu, Yoshihiro Konno, Jun Yoneda, Koji Yamamoto, Jiro Nagao. Geological setting and characterization of a methane hydrate reservoir distributed at the first offshore production test site on the DainiAtsumi Knoll in the eastern Nankai Trough, Japan. *Marine and Petroleum Geology* 146. March 2015.

**Article history:**

Received: October 03, 2017

Accepted: January 14, 2018

**For citation:**

Malukov V.P., Tokarev I.S. (2018). Research on the development of the Nankai gas hydrates field. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(1), 127–136. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-1-127-136

**Bio Note:**

*Valery P. Malyukov* — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering at the Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Scientific interests:* innovative technologies in the oil and gas industry, gas hydrates, nanotechnologies in the oil and gas industry, underground reserve of hydrocarbons. *Contact information:* e-mail: v.malyukov@mail.ru

*Ivan S. Tokarev* — master student of the department of development and exploitation of oil deposits of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University). *Scientific interests:* gas hydrates, reservoir engineering, well engineering of hydrocarbons. *Contact information:* e-mail: RedFriendlyAnt@gmail.com

ф. СП-1

ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

АБОНЕМЕНТ на журнал

**18230**

(индекс издания)

**ВЕСТНИК РУДН**  
**Серия «Инженерные**  
**исследования»**

Количество  
комплектов:

на 2018 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

на журнал

**18230**

(индекс издания)

ПВ	место	литер

**ВЕСТНИК РУДН**

**Серия «Инженерные исследования»**

Стои- мость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	_____ руб. ____ коп.		

на 2018 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

---

ф. СП-1

ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

АБОНЕМЕНТ на журнал

--

(индекс издания)

**ВЕСТНИК РУДН**

Серия \_\_\_\_\_

Количество комплектов:

--

на 2018 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

**ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА**

на журнал

--

(индекс издания)

ПВ	место	литер

**ВЕСТНИК РУДН**

Серия \_\_\_\_\_

Стоимость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	
	переадресовки	_____ руб. ____ коп.		

на 2018 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

---