



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

Том 19 № 3 (2018)

DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-3

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

Научный журнал

Издается с 2000 г.

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

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич — доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, директор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Заместитель главного редактора

Резник Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой НУК «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Ответственный секретарь

Ткаченко Ирина Михайловна — кандидат технических наук, доцент департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Члены редакционной коллегии

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

Галишикова Вера Владимировна — доктор технических наук, директор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Дивеев Асхат Ибрагимович — доктор технических наук, профессор, заведующий сектором проблем кибернетики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление», Российская академия наук

Захаров Валерий Николаевич — доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, директор Института проблем комплексного освоения недр, Российская академия наук

Калугин Владимир Тимофеевич — доктор технических наук, профессор, руководитель Научно-учебного комплекса специального машиностроения, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Кополов Владимир Николаевич — доктор технических наук, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Корнилова Анна Владимировна — доктор технических наук, профессор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов

Мальшев Вениамин Васильевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа, Московский авиационный институт

Омельченко Ирина Николаевна — доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, декан факультета инженерного бизнеса и менеджмента, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Попов Гарри Алексеевич — доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Московский авиационный институт

Рыльникова Марина Владимировна — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр, Российская академия наук

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

Агравал Бридж — профессор Навал Постградуейт Скул, Монтерей, США

Варатараджу Ренугант — профессор Университета Путра Малайзия, Малайзия

Герман Анна — профессор Университета Беира 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

Хоуэлл Кэтлин — профессор, Университет Пердью, Уэсм-Лафайетт, 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: *И.В. Успенская*
Компьютерная верстка: *О.Г. Горюнова*

Адрес редакции:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: (495) 955-07-16; e-mail: ipk@rudn.university

Адрес редакционной коллегии серии «Инженерные исследования»:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 3
Тел.: (495) 955-07-92; e-mail: engjournalrudn@rudn.university

Подписано в печать 31.08.2018. Выход в свет 14.09.2018. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «NewtonС».

Усл. печ. л. 11,29. Тираж 500 экз. Заказ № 813. Цена свободная.

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

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

Отпечатано в типографии ИПК РУДН

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. (495) 952-04-41;
e-mail: ipk@rudn.university



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

VOLUME 19 NUMBER 3 (2018)

DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-3

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

Founded in 2000

Founder: PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY OF RUSSIA

EDITOR-IN-CHIEF

Yury N. Razumny — Professor, Director of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia

ASSOCIATE EDITOR-IN-CHIEF

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

ASSISTANT TO THE EDITOR-IN-CHIEF

Irina M. Tkachenko — Associate Professor, Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia

EDITORIAL BOARD

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

Vera V. Galishnikova — Associate Professor, Director of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia

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

Valery N. Zaharov — Professor, 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

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

Vladimir N. Konoplev — Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia

Anna V. Kornilova — Associate Professor, Professor of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia

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

Irina N. Omelchenko — Professor, Dean of the Department of Engineering Business and Management, Bauman Moscow State Technical University

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

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

Valeriy M. Fomin — Professor, Moscow Polytechnic University

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

Renuganth Varatharajoo — Professor, University Putra Malaysia, Malaysia

Anna Guerman — Professor, Universidade da Beira Interior, Portugal

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

Kathleen Howell — Professor, Purdue University, USA

Arun Misra — Professor, McGill University, Canada

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

David Spencer — Professor, Penn State University, USA

Kathleen Howell — Professor of the Purdue University, West Lafayette, USA

Roberto Furfaro — Associate Professor, Professor, University of Arizona

Tetsuo Yasaka — Professor Emeritus, Kyushu University, Japan

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 *I.V. Uspenskaya*
Computer design: *O.G. Gorunova*

Address of the editorial board:
3, Ordzhonikidze str., Moscow, 115419, Russian Federation
Ph. +7 (495) 955-07-16; e-mail: ipk@rudn.university

Address of the editorial board Series "Engineering researches":
3, Ordzhonikidze str., Moscow, 115419, Russian Federation
Ph. +7 (495) 955-07-92;
e-mail: 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., Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House:
3, Ordzhonikidze str., Moscow, 115419, Russian Federation,
Ph. +7 (495) 952-04-41; e-mail: ipk@rudn.university

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Шаталова И.И., Шкарин К.В. Коэффициент преобразования и мощность теплового насоса на нерасчетных режимах 271

Жедь О.В., Копылов В.В. Применение компьютерной обработки экспериментальных данных исследования зоны стружкообразования на оптических моделях..... 277

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Гягяева А.Г., Кожанова Е.Р. Применение авторских программных продуктов при обучении студентов средних специальных и высших учебных заведений..... 289

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬНЫЕ НАУКИ

Аникеев И.Д., Голиков А.В. Вывод и анализ методик расчета центрально-сжатых стальных стержней, заложенных в различные нормативные документы..... 299

Стрыгина М.А., Грицук И.И. Гидрологическая безопасность и анализ риска аварий гидрозлов..... 317

ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО. НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Туре Л., Чаусов А.А., Котельников А.Е. Петрографическая характеристика бокситов месторождений рудного поля Кулоре (Kouloge)..... 325

Белешапка И.Е., Ганиев Д.И. Применение фильтрационных исследований для изучения технологий разработки месторождений нетрадиционных коллекторов и трудноизвлекаемых запасов нефти 343

Абрамов В.Ю., Оффiong М.Б. Стратиграфия района нефтяного месторождения Efi-Field прибрежной зоны дельты р. Нигер..... 358

Голик В.И., Келехсаев В.Б., Майстров Ю.А., Олисаев А.С. Направления совершенствования механохимических процессов при утилизации хвостов обогащения руд..... 365

Аль-Гурейри А.Я., Наравас А.К., Усова В.М. Морфонеотектоника и перспективы нефтегазоносности пустынь Ирака 378

Исайчева Е.Г., Фаттахов Л.Р., Абдулкеримов Р.Ф. Решение геолого-технологических задач в карбонатных разрезах с развитой вторичной емкостью на примере месторождения Волго-Уральской нефтегазоносной провинции 391

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MATERIAL SCIENCE

- Antipov Yu.A., Shatalov I.K., Shatalova I.I., Shkarin K.V.** Heat pump coefficient of conversion and power on off-nominal modes 271
- Zhed O.V., Kopylov V.V.** Application of computer processing of experimental data from analysis of chip formation zone on photoelastic models..... 277

COMPUTER SCIENCE, COMPUTATIONAL ENGINEERING AND CONTROL

- Gyagyaeva A.G., Kozhanova E.R.** Use of author-developed software products for training college and university students 289

ARCHITECTURE AND CIVIL ENGINEERING

- Anikeev I.D., Golikov A.V.** Derivation and analysis of methods for calculation of axially loaded steel compression members based on different building codes..... 299
- Strygina M.A., Gritsuk I.I.** Hydrological safety and risk assessment of hydraulic structures 317

GEOLOGY, MINING AND OIL&GAS ENGINEERING. EARTH SCIENCE

- Toure L., Chausov A.A., Kotelnikov A.E.** Petrographic characteristic of bauxites of the Kouloire ore field 325
- Beloshapka I.E., Ganiev D.I.** Application of filtration tests for studying technologies for development of non-traditional reservoirs and tight oil reserves 343
- Abramov V.Yu., Offiong M.B.** Stratigraphy of “Efi-Feild” oil deposit of Niger delta on-shore region 358
- Golik V.I., Kelekhsaev V.B., Majstrov Yu.A., Olisaev A.S.** Directions for improvement of mechanochemical processes of utilizing ore tailings..... 365
- Al-Gurairy A.S.Y., Naravas A.K., Usova V.M.** Morphoneotectonics and prospects of oil and gas future is the desert of Iraq 378
- Isaycheva E.G., Fattakhov L.R., Abdulkerimov R.F.** Solution for geological and technological problems in carbonate sections with developed secondary capacity on the example of Volga-Ural Petroleum and Gas Province deposit 391



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-271-276

УДК 621. 577

Коэффициент преобразования и мощность теплового насоса на нерасчетных режимах

Ю.А. Антипов, И.К. Шаталов, И.И. Шаталова, К.В. Шкарин

Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

В статье рассматриваются изменения параметров сжатия теплового насоса (ТН), определяющие его эффективность, — мощность и коэффициент преобразования μ на нерасчетных режимах. В связи с тем, что параметры низкопотенциальных источников тепла для ТН изменяются, меняется при этом и потребность в тепловой энергии. В связи с этим актуальной задачей является исследование работы ТН на нерасчетных режимах. Для анализа рабочего процесса на режимах частичной мощности ТН применяется поршневой компрессор. Авторы рассматривают следующие варианты перехода ТН на нерасчетный режим: изменение температуры воды на входе в конденсатор; изменение расхода воды через конденсатор; изменение расхода рабочего тела. На основе анализа зависимостей для определения коэффициента преобразования и мощности, потребляемой ТН, показано, что при переходе теплового насоса на нерасчетный режим эти параметры меняются. Увеличение температуры воды на входе в конденсатор приводит к уменьшению коэффициента преобразования μ , а при понижении температуры — к возрастанию μ . Уменьшение расхода воды, охлаждающей конденсатор, приводит к сдвигу точки начала сжатия рабочего тела в область его более высокой влажности и снижает эффективность компрессора. Уменьшение расхода рабочего тела практически не влияет на эффективность цикла Карно, а величина снижается из-за роста влажности газа.

Ключевые слова: тепловой насос, нерасчетный режим работы, поршневой компрессор, коэффициент преобразования

Введение

Тепловые насосы (ТН) получили широкое распространение в различных областях: жилищном строительстве, машиностроении, металлургии и т.д. Основная цель их применения — экономия энергетических ресурсов, улучшение экологических показателей. Удовлетворение требований Монреальского протокола, Киотского и Парижского соглашений является важной задачей науки и производства по продвижению теплонасосных технологий. Исследованию различных режимов эксплуатации ТН посвящена данная работа.

Целью работы является разработка методики определения параметров ТН на нерасчетных режимах с использованием опытных данных и результатов предыдущих исследований.

Методы исследования

В работе на основе теории тепловых насосов рассматриваются изменения основных параметров ТН. Коэффициент преобразования μ и мощность N ТН

являются главными параметрами, характеризующими его эффективность. Величина μ есть отношение тепловой мощности (теплового потока) Q , вырабатываемой ТН к мощности N , затрачиваемой на привод компрессора:

$$\mu = \frac{Q}{N} = \frac{G_B(t_{B2} - t_{B1})C_{pB}}{G(i_{2ад} - i_1)/\eta_k}, \quad (1)$$

где G_B и G — расходы воды, охлаждающей конденсатор и рабочего тела ТН; t_{B1} и t_{B2} — температура охлаждающей воды на входе и выходе из конденсатора; C_{pB} — теплоемкость воды; i_1 — энтальпия рабочего тела ТН на входе в компрессор; $i_{2ад}$ — энтальпия рабочего тела при адиабатическом сжатии на выходе из компрессора; η_k — КПД компрессора, $\eta_k = \eta_i \eta_M$; η_i , η_M — внутренний и механический КПД компрессора.

Для определения μ из (1) можно нанести рабочий цикл ТН на ts -диаграмму, определить величины энтальпий и подсчитать теплоту, получаемую в конденсаторе, переохладителе и испарителе [1; 2]. Для дальнейшего анализа удобно воспользоваться приближенным соотношением, основанном на обратном цикле Карно ТН:

$$\mu = k\mu_t = k \frac{T_k}{T_k - T_i}, \quad (2)$$

где k — опытный коэффициент, $k = 0,5 \div 0,6$; μ_t — коэффициент преобразования цикла Карно; T_k и T_i — температуры конденсации и испарения, т.е. температуры рабочего тела на выходе из компрессора и на его входе при адиабатическом сжатии.

Из (2) следует, что при малых подогревах $\Delta T = T_k - T_i \leq 30$ К, при $T_k = 300$ К, коэффициент μ может достигать 5 и более. Рассмотрим рабочий процесс ТН с поршневым компрессором.

Условия перехода ТН на нерасчетный режим

Переход на нерасчетный режим связан со следующими обстоятельствами:

- изменением температуры воды на входе в конденсатор t_{B1} ;
- изменением расхода воды G_B ;
- изменением расхода рабочего тела G .

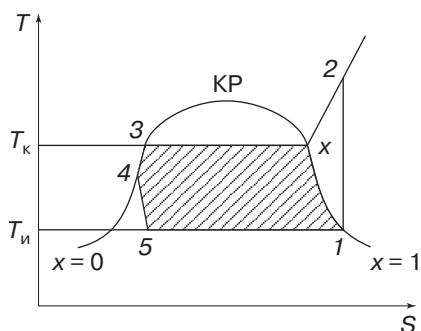


Рис. 1. Цикл теплового насоса в T - S диаграмме
[Fig. 1. Heat pump cycle on T - S diagram]

1. *Изменение температуры охлаждающей воды.* На графике (рис. 1) схематично изображен цикл ТН: 1—2 — сжатие рабочего тела в компрессоре; 2— x —3 — его охлаждение в конденсаторе; 3—4 — охлаждение в переохладителе; 4—5 — дросселирование; 5—1 — передача теплоты в испарителе.

Увеличение температуры воды t_{B1} на входе в конденсатор, как следует из (1), приводит к уменьшению μ , а при паде-

нии $t_{в1}$ — к возрастанию μ . При известной температуре $t_{в1}$ и температуре рабочего тела в конденсаторе t_k температура $t_{в2}$ определится из известного отношения

$$t_{в2} = t_{в1} + E(t_k - t_{в1}),$$

где E — тепловая эффективность конденсатора, равная 0,7–0,9; t_k — температура рабочего тела в конденсаторе.

Из этого уравнения следует, что температура $t_{в2}$ на 3–5 °С ниже, чем t_k , а температура $t_{в1}$ на 3–5 °С выше, чем $t_{и}$.

Кроме этого, как видно из рис. 1, увеличение T_k приводит к росту давления рабочего тела в конденсаторе p_k и росту $i_{2ад}$, что не только влияет на μ , но и приводит к изменению мощности, затрачиваемой на привод компрессора:

$$N = G(i_{2ад} - i_1) \frac{1}{\eta_k}.$$

2. Уменьшение расхода воды G_v через конденсатор приводит к уменьшению диаграммы цикла, как показано на рис. 2. При этом КПД цикла Карно не меняется, но тепловая мощность ТН уменьшается из-за снижения расхода G_v . В результате коэффициент преобразования падает (1).

При уменьшении расхода воды через испаритель диаграмма цикла меняется так, как показано на рис. 2. При этом на вход в компрессор поступает влажный пар рабочего тела, сжатие которого связано со снижением КПД компрессора. Это происходит не только из-за роста влажности, но и из-за уменьшения показателей адиабаты [3].

3. Уменьшение расхода рабочего тела производится путем уменьшения частоты вращения компрессора n_k . При этом снижается мощность, затрачиваемая на привод компрессора

$$G = V_n \cdot \lambda \cdot \rho \cdot n_k / 60,$$

где V_n — рабочий объем цилиндров; λ — коэффициент подачи, $\lambda = 0,75–0,85$; ρ — плотность рабочего тела на входе.

В том случае, если необходим постоянный подогрев воды в тепловом насосе, компрессор должен работать при постоянной степени сжатия $\pi_k = \text{const}$ и, как следствие, при постоянной плотности газа на его входе. Если при этом температура входящей и выходящей воды $t_{в1}$ и $t_{в2}$ постоянна, то это означает, что переход на частичные режимы связан с уменьшением частоты вращения компрессора. При этом его КПД и λ увеличивается (рис. 3) и коэффициент преобразования растет, а затрачиваемая на привод мощность снижается [4; 5].

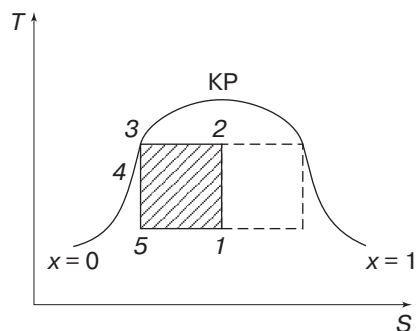


Рис. 2. Идеализированный цикл теплового насоса при уменьшении расхода воды через испаритель
[Fig. 2. Heat pump ideal cycle with decrease in water flow rate through the evaporator]

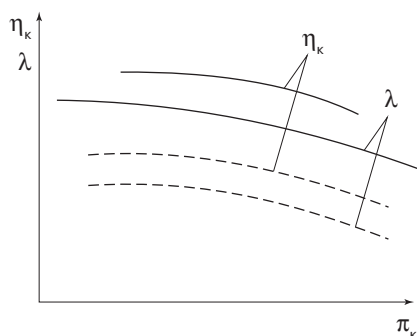


Рис. 3. Характеристика поршневого компрессора в зависимости от степени повышения давления и сухости пара рабочего тела x : — $x = 1$; - - - $x = 0,7$)

[Fig. 3. Characteristics of reciprocating compressor as a function of pressure ratio and dryness of steam of the working medium x : — $x = 1$; - - - $x = 0,7$)]

Снижение потребности в горячей воде от теплового насоса вызывает дросселирование паров рабочего тела с высокой влажностью и, следовательно, снижение расхода низкотемпературной воды приводит к сжатию в компрессоре влажного газа. Из-за этого уменьшаются π_k и μ , и, как следствие, растет опасность гидравлического удара [4].

При уменьшении расхода рабочего тела и при постоянных температурах T_k и $T_{и}$ точка начала дросселирования смещается в область влажного пара ($x > 0$). При этом КПД цикла Карно практически не изменяется, однако КПД компрессора снижается из-за уменьшения расхода и увеличения влажности пара [4; 5]. Это приводит к уменьшению коэффициента преобразования.

Заключение

При увеличении температуры воды, охлаждающей конденсатор, коэффициент преобразования ТН падает.

Уменьшение расхода воды, охлаждающей конденсатор, приводит к сдвигу точки начала сжатия рабочего тела в область его более высокой влажности, приводит к уменьшению тепловой мощности ТН и, как следствие, к уменьшению μ .

Уменьшение расхода рабочего тела практически не влияет на КПД цикла Карно, а величина μ снижается из-за роста влажности газа, сжимаемого компрессором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шаталов И.К. Теплонасосные установки с приводом от тепловых двигателей: учеб. пособие. М.: РУДН, 2009. 94 с.
- [2] Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Ч. 1: Теория и расчет. М.: Колос, 2006. 456 с.
- [3] Фотин Б.С., Пирумов И.Б., Прилуцкий И.К., Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Л.: Машиностроение, 1987. 872 с.
- [4] Antipon Y.A., Shatalov I.K., Sobennikov E.V. Influence of Moistness of Working Fluid on Delivery Coefficient of Reciprocating Compressor. Chemical and Petroleum Engineering. 2014. № 1. С. 38–42.
- [5] Барский И.А., Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Терехов Д.В. Показатели поршневого компрессора на частичных режимах // Химическое и нефтяное машиностроение. 2011. № 1. С. 31–33.

© Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Шаталова И.И., Шкарин К.В., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 29 мая 2018

Дата принятия к печати: 15 июля 2018

Для цитирования:

Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Шаталова И.И., Шкарин К.В. Коэффициент преобразования и мощность теплового насоса на нерасчетных режимах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 271–276. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-271-276

Сведения об авторах:

Антипов Юрий Александрович — кандидат технических наук, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* проектирование, производство и испытание конструкций элементов тепловых двигателей. *Контактная информация:* e-mail: rudn-tit@yandex.ru

Шаталов Иван Касьянович — кандидат технических наук, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* проектирование и растет теплонаносных установок. *Контактная информация:* e-mail: rudn-tit@yandex.ru

Шаталова Ирина Ивановна — кандидат сельскохозяйственных наук, доцент департамента инженерного бизнеса и менеджмента Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* оценка эффективности применения инновационных технологий в технике. *Контактная информация:* e-mail: rudn-tit@yandex.ru

Шкарин Кирилл Владимирович — ассистент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* проектирование, производство и испытание конструкций элементов тепловых двигателей. *Контактная информация:* e-mail: gohamoha69@gmail.com

Heat pump coefficient of conversion and power on off-nominal modes

Yu.A. Antipov, I.K. Shatalov, I.I. Shatalova, K.V. Shkarin

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

Abstract. The article considers the variation of heat pump (HP) compression parameters which define its effectiveness: power and coefficient of conversion (μ) on off-nominal modes of operation. Taking into account that the parameters of low-potential sources of heat for HP change, the demand for thermal energy also changes; study of HP operating on off-nominal modes is relevant. To analyze the operating process on partial power modes of HP, a reciprocating compressor is used. The following options are examined by authors as conditions of HP transitioning to the off-nominal mode: change in temperature of water at the condenser inlet; change in flow rate of water passing through the condenser, change in flow rate of the working medium. Based on the analysis of relationships for determining the coefficient of conversion and power consumed by HP, it is shown that these parameters change if HP transitions to off-nominal mode. The increase of temperature entering the condenser leads to decrease

in μ , and with temperature decrease μ increases. Decrease in flow rate of water cooling the condenser moves the beginning point of compression of the working medium to higher moisture region and reduces the efficiency of the compressor. Working medium flow rate decrease virtually does not affect the Carnot cycle efficiency and μ decreases because of rising moisture of gas.

Key words: heat pump, off-nominal operating mode, reciprocating compressor, coefficient of conversion

REFERENCES

- [1] Shatalov I.K. *Teplonasosnye ustanovki s privodom ot teplovykh dvigatelei: ucheb. posobie* [Heat pump systems powered by heat engines: Textbook]. Moscow: PFUR Publ., 2009. 94 p. (In Russ.)
- [2] Plastinin P.I. *Porshnevye kompressory. Ch. 1: Teoriya i raschet* [Reciprocating compressors. Part 1: Theory and calculation]. Moscow: Kolos Publ., 2006. 456 p. (In Russ.)
- [3] Fotin B.S., Pirumov I.B., Priluckij I.K., Plastinin P.I. *Porshnevye kompressory* [Reciprocating compressors]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1987. 872 p. (In Russ.)
- [4] Antipon Y.A., Shatalov I.K., Sobennikov E.V. Influence of Moistness of Working Fluid on Delivery Coefficient of Reciprocating Compressor. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2014. No. 1. 38–42.
- [5] Barskij I.A., Antipov Yu.A., Shatalov I.K., Terekhov D.V. Pokazateli porshnevoogo kompressora na chastichnykh rezhimakh [Reciprocating compressor characteristics on partial modes]. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering]. 2011. No. 1. 31–33. (In Russ.)

Article history:

Received: May 29, 2018

Accepted: July 15, 2018

For citation:

Antipov Yu.A., Shatalov I.K., Shatalova I.I., Shkarin K.V. (2018). Heat pump coefficient of conversion and power on off-nominal modes. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(3), 271–276. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-271-276

Bio note:

Yuriy A. Antipov — Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Mechanical and Instrument Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* design, production and testing of heat engines elements structures. *Contact information:* e-mail: rudn-tit@yandex.ru

Ivan K. Shatalov — Candidate of Technical Sciences, professor of the Department of Mechanical and Instrument Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* design and calculation of heat pump systems. *Contact information:* e-mail: rudn-tit@yandex.ru

Irina I. Shatalova — Candidate of Agricultural Sciences, associate professor of the Department of Engineering Business and Management, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* assessment of feasibility of innovation technologies in engineering. *Contact information:* e-mail: rudn-tit@yandex.ru

Kirill V. Shkarin — assistant of the Department of Mechanical and Instrument Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* design, production and testing of heat engines elements structures. *Contact information:* e-mail: gohamoha69@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-277-288

УДК 621.9.02

Применение компьютерной обработки экспериментальных данных исследования зоны стружкообразования на оптических моделях

О.В. Жедь, В.В. Копылов

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

В экспериментах методом фотомеханики на оптических моделях непосредственно фиксируется только картина изохром, а изоклины (линии равных углов наклона главных напряжений) приходится вычерчивать вручную для каждого из фиксированных значений плоскостей поляризации. Дальнейшая обработка также производится вручную, изостаты (траектории главных напряжений) проводятся по картине изоклин, а по полученному полю изостат строится поле линий скольжения или максимальных касательных напряжений. Такой многоступенчатый путь (изоклины — изостаты — линии скольжения), содержащий ручную обработку на каждом этапе, приводит к накоплению ошибок. Настоящее исследование в значительной мере снимает указанные проблемы. С целью реализации нагружения, подобного действующему на передней поверхности режущего клина, были разработаны крупномасштабная поляризационно-оптическая модель и специальный экспериментальный стенд. Масштаб модели (10:1) был выбран максимально возможным из условия размещения ее в оптическом поле ППУ-7 (плоская поляризационная установка). Приводится схема стружкообразования, форма поляризационно-оптической модели и ее нагружения. Описывается схема стенда для нагружения зоны стружкообразования исследуемой модели. Задача уменьшения трудоемкости экспериментальной части и увеличения точности полученных результатов решалась путем применения цифровой фотокамеры и специально разработанной технологии компьютерной обработки фотограмм. Характер нагружения моделей в экспериментах описан эпюрой давления. Результаты экспериментов представлялись в виде серии цифровых фотографий, подвергавшихся дальнейшей компьютерной обработке, сделанных с целью получения сетки изоклин, построение поля изостат, а затем и поля линий скольжения. Анализ применения цифровой регистрации и компьютерной обработки фотограмм значительно уменьшает время выполнения экспериментальной части за счет отказа от традиционной методики рисования изоклин на кальке. Кроме этого, повышается точность полей изостат и линий скольжения благодаря тому, что в исходном для их построения поле изоклин исключаются ошибки, неизбежные при ручной фиксации.

Ключевые слова: фотомеханика, оптическая модель, зона стружкообразования, изоклины, изостаты, линии скольжения

Введение

Экспериментальным исследованиям в зоне стружкообразования при резании посвящены многочисленные работы [1—17]. Несмотря на то, что эти исследования имеют более чем столетнюю историю, многие важные для теории и практики вопросы продолжают оставаться недостаточно проработанными. Экспери-

ментальные работы по преимуществу используют косвенные методы: металлографический метод, метод микроанализа деформированного состояния, метод измерения микротвердости и др. В ряде работ применялся поляризационно-оптический метод [4] с использованием прозрачных моделей, обладающий такими преимуществами, как наглядность, реализация поэтапного нагружения, удобный и точный пересчет напряжений от модели к натуре.

Однако применение этого метода сдерживается из-за присущих ему недостатков. Во-первых, это трудности в реализации распределенной нагрузки, особенно распределенной тангенциальной нагрузки. Во-вторых, это проблемы фиксации и обработки полученных результатов: непосредственно фиксируется только картина изохром, а изоклины (линии равных углов наклона главных напряжений) приходится вычерчивать вручную для каждого из фиксированных значений плоскостей поляризации. Дальнейшая обработка также производится вручную, изостаты (траектории главных напряжений) проводятся по картине изоклин, а по полученному полю изостат строится поле линий скольжения.

Такой многоступенчатый путь (изоклины — изостаты — линии скольжения), содержащий ручную обработку данных, приводит к накоплению ошибок на каждом этапе. Полученный в этом случае конечный результат иногда аргументированно критикуется, так как в некоторых областях исследуемого пространства картина линий скольжения противоречит известным теоретическим положениям (особенно на линиях границы).

Разработка методики и техники исследования

Настоящее экспериментальное исследование в значительной мере снимает указанные проблемы. С целью реализации нагружения, подобного действующему на передней поверхности режущего клина, были разработаны крупномасштабная поляризационно-оптическая модель и специальный экспериментальный стенд. Масштаб модели (10:1) был выбран максимально возможным из условия размещения ее в оптическом поле.

На рисунке 1 показана схема стружкообразования, форма поляризационно-оптической модели и ее нагружение; пунктиром показано наложение модели.

Нагружающий стенд представлен на рис. 2.

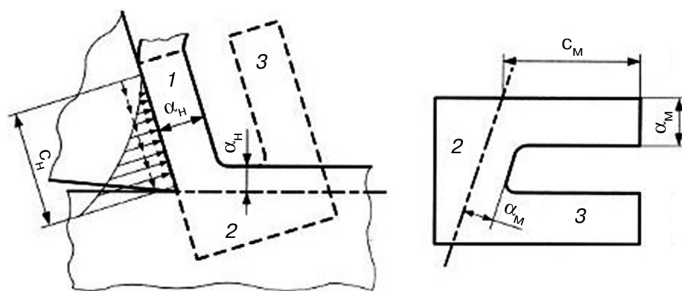


Рис. 1. Схема формирования поляризационно-оптической модели зоны стружкообразования: 1 — область моделирует стружку; 2 — обрабатываемая заготовка; 3 — область для закрепления модели на стенде

[Fig. 1. Formation scheme of chip-forming zone photoelastic model: 1 — region models the chips; 2 — work piece to be processed; 3 — area for fixing model on the stand]

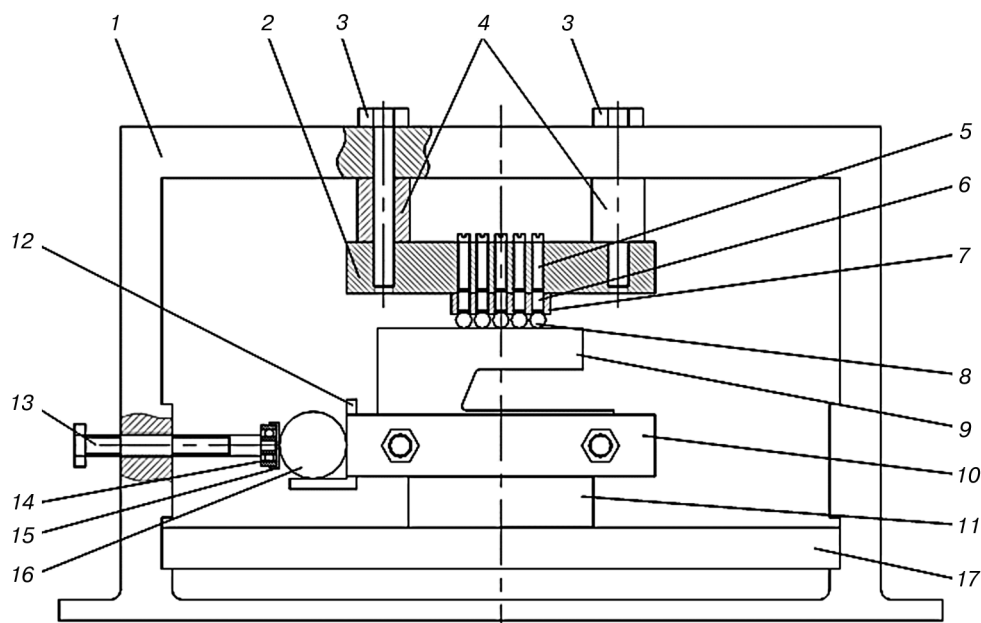


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для нагружения зоны стружкообразования исследуемой модели: 1 — рама; 2 — плита; 3 — винт; 4 — проставки; 5 — нагружающие винты; 6 — плунжеры; 7 — сепаратор; 8 — дисковые оптические динамометры для задания закона давления на стружку; 9 — оптическая модель; 10 — фиксатор модели; 11 — ползушка; 12 — кронштейн; 13 — винт; 14 — упорный подшипник; 15 — крышка; 16 — дисковый динамометр для тангенциальной нагрузки; 17 — опорная плита

[Fig. 2. Scheme of the experimental stand for loading chip formation zone of the model under study: 1 — frame; 2 — plate; 3 — screw; 4 — spacers; 5 — loading screws; 6 — plungers; 7 — separator; 8 — optical disc dynamometers for setting the pattern of pressure variation on the chips; 9 — optical model; 10 — model fixture; 11 — sliding piece; 12 — bracket; 13 — screw; 14 — thrust bearing; 15 — cover; 16 — disc dynamometer for tangential loading; 17 — baseplate]

Модель 9 зажимается с помощью фиксатора 10 на ползушке 11, установленной в направляющих качения на плите 17. В верхней части рамы 1 расположено устройство для создания усилий, имитирующих нормальную распределенную нагрузку на поверхности контакта стружки с передней поверхностью резца. Она состоит из плиты 2, закрепленной на раме винтами 3 через проставки 4, и пяти нагружающих винтов 5, перемещающих плунжеры 6, которые размещены в сепараторе 7. Усилие на модель передается через дисковые оптические динамометры 8. Сбоку слева смонтировано устройство для реализации тангенциальной составляющей на передней поверхности: винт 13, упорный подшипник 14 с крышкой 15. Для передачи тангенциального усилия и его фиксации используется дисковый динамометр 16, установленный в кронштейне 12.

Задача уменьшения трудоемкости экспериментальной части и увеличения точности полученных результатов решалась путем применения цифровой фотокамеры и специально разработанной технологии компьютерной обработки фотограмм. Экспериментальные исследования методом фотомеханики проводились на модернизированной установке ППУ-7. Характер нагружения моделей в экспериментах описан эпюрой давления (рис. 3, а).

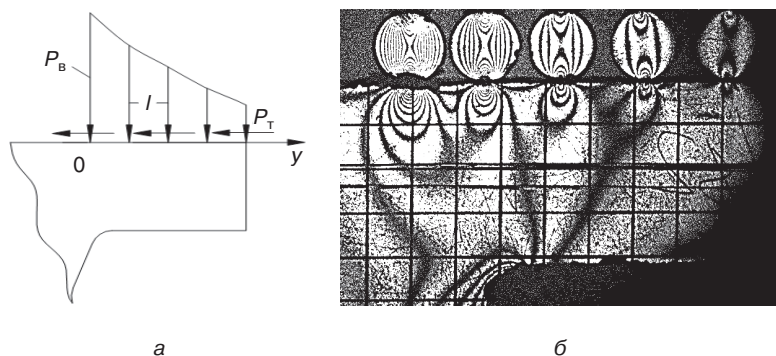


Рис. 3. Задание нагрузки на оптическую модель: а — вариант эпюры давления с вертикальной P_v и тангенциальной P_t составляющей; б — оптические диски в нагруженном состоянии, моделирующие эпюру нормальной составляющей контактной нагрузки
[Fig. 3. Applied loads on photoelastic model: а — version of pressure diagram with vertical P_v and tangential P_t component; б — optical discs in loaded state, simulating the diagram of normal component of the contact load]

Крупномасштабная модель в данном исследовании позволила разместить пять нагружающих узлов. Для того, чтобы имитировать закон распределения нормального контактного давления на передней поверхности режущего клина, значения сосредоточенных сил в нагружающих оптических дисках поддерживались в соотношении 38:21:11:5,3:1 по направлению от вершины резца к точке отрыва стружки от передней поверхности. Расстояния между узлами составляли 9 мм. На первом диске постоянно поддерживалась нагрузка, вызывающая девять полос, на остальных дисках количество полос обеспечивало вышеуказанную пропорцию. Для создания эпюры давления в вертикальном направлении использовались диски из полиметилметакрилата типа Э2, а для диска, обеспечивающего моделирование горизонтальной составляющей нагрузки, применялся материал самой модели, а именно ЭД6-МТГФА. По результатам тарировки оптически чувствительного материала Э2 установлено значение оптической постоянной $\sigma_0^{1,0} = 13,73$ кг/см/пол, цена полосы модели $\sigma_0^t = 27,46$ кг/см²/пол.

Результаты экспериментов представлялись в виде серии цифровых фотографий, подвергавшихся дальнейшей компьютерной обработке по оригинальной методике (рис. 4).

Для расшифровки фотограмм применялся метод полос, позволяющий быстро и эффективно судить о характере распределения напряжений и их уровне в произвольной точке модели. Была выполнена серия экспериментов. В настоящей работе приведем результаты обработки фотограмм, которые получены при сообщении нормальной и тангенциальной нагрузки на оптической модели стружкообразования.

Первый снимок (фотограмма) каждой серии (рис. 4, а) представлял собой модель, снятую в белом свете при круговой поляризации. Эта фотография необходима для выявления нулевых точек на нагруженной модели. Остальные снимки серии также сняты в белом свете, но уже при плоской поляризации. Все исходные фотограммы на рис. 4 из цветных переведены в формат черно-белого изображения.

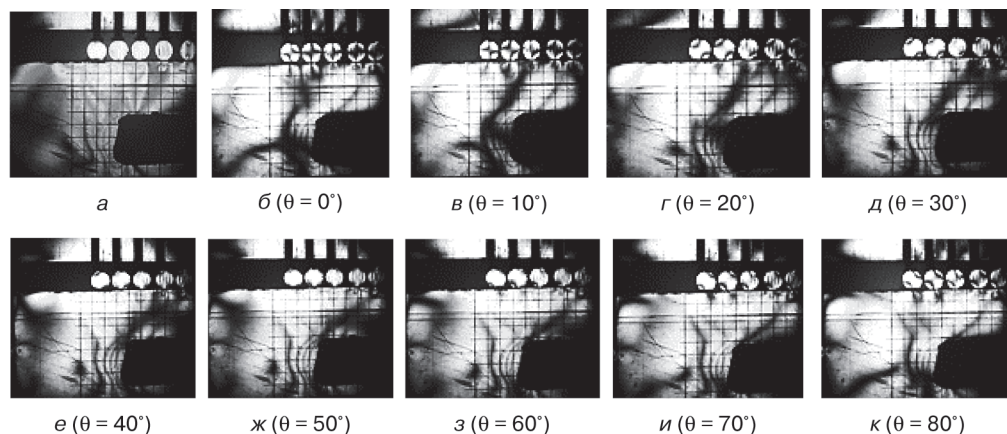


Рис. 4. Фотограммы нагружения модели зоны стружкообразования нормальной и тангенциальной нагрузкой: а — круговая поляризация белого света; б–к — плоская поляризация белого света (жирные линии изоклин меняют свое положение на фотограмме в зависимости от угла θ); θ — параметр изоклины

[**Fig. 4.** Photograms of chip formation zone model loaded by normal and tangential loads: а — circular polarization of white light; б–к — planar polarization of white light, bold lines of isoclines change their position on the photogram as a function of angle θ ; θ is the isocline parameter]

Компьютерная обработка результатов состояла из нескольких этапов, цель которых — получение сетки изоклин в формате, доступном для дальнейшей обработки, и построения поля изостат, а затем и поля линий скольжения: форматирование, предварительная подготовка изображения, изменение разрешения, четкости и других параметров фотографии.

Первый этап обработки результатов — предварительная обработка и подготовка фотографий для импортирования в программу AutoCAD. Для этого использовался редактор графических изображений Adobe Photoshop. Выполнялось приведение фотографии в нужный размер, устранение возможных нечеткостей изображения и небольшого угла наклона сетки ($0,5–1^\circ$), т.е. тех недостатков, которые могут возникнуть в процессе фотографирования. Нечетко сфотографированное изображение нужно отредактировать с помощью фильтра резкости, увеличивая контрастность соседних пикселей. Необходимо также добиваться того, чтобы линии сетки были строго горизонтальны и вертикальны.

После импортирования снимков в программу AutoCAD производилась настройка панелей инструментов для создания новых слоев. Использование слоев — необходимый элемент методики, так как это позволяет упорядочить работу и в дальнейшем получить нужный результат. Наиболее трудоемким является построение каждого поля изоклин, которое основывается на десяти фотографиях, полученных опытным путем (см. рис. 4). Фотографии импортируются в программу с помощью специальной команды. Чтобы фотографии не перемешивались и не перекрывали друг друга, для каждой из них должен быть создан отдельный слой. Помимо того, общий элемент построения — масштабная сетка — также требует отдельного слоя для того, чтобы она не перекрывалась фотографиями. Также в отдельном слое чертятся изоклины каждой фотографии. Это делается для удобства просмотра, изучения и возможной коррекции изоклин. Таким образом, в итоге необходимо создать 21 слой.

Важным моментом является построение линий начальных (исходных) точек семейства изоклин. Необходимо задать базовую линию точек отсчета для всего семейства изоклин, так как рассматриваемая серия фотографий (см. рис. 4) имеет небольшие погрешности, полученные в процессе фотографирования и обработки. Для построения базовой линии импортируют первую фотографию с параметром изоклин $\theta = 0^\circ$ (рис. 4, б).

Далее выставляется слой, соответствующий данной линии. Определяем местоположение данной линии исходя из фотографии, отступив от левого края фотографии 5–7 см, и фиксируем начало базовой линии. Далее строим прямую линию через место предполагаемого нахождения базовой линии. Отступив от другого конца фотографии, фиксируем конечную точку построения данной линии (рис. 5). Теперь, имея ее начало и конец, строим ее снова, но уже в слое следующей изоклины. Все изоклины будут начинаться именно на этой первой (базовой) линии, точка отсчета каждой из изоклин будет лежать на ней.

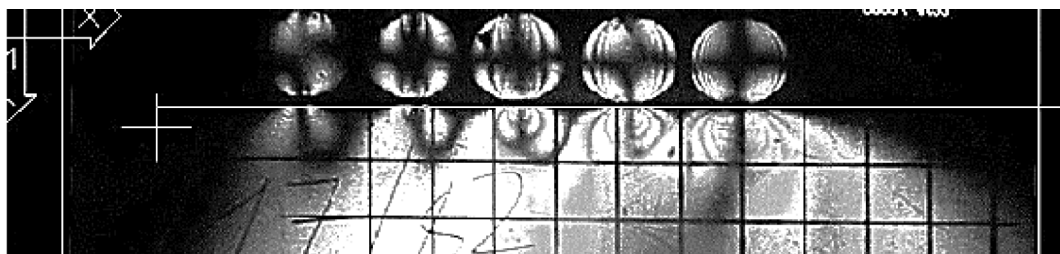


Рис. 5. Построение линии первых точек
[Fig. 5. Construction of line of the first points]

Построение изоклины

Для ее построения необходимо выставить слой, соответствующий параметру данной изоклины. В нашем случае начинаем с изоклины $\theta = 0^\circ$. Выбираем иконку инструмента (~) и указываем начальную точку построения изоклины на линии начальных точек, исходя из ее месторасположения на фотографии. Затем повторяем рисунок изоклины, тем самым переводя ее в вид полилинии. Дойдя до конца, указываем конец изоклины и фиксируем завершение ее построения. Далее выбираем нужные изгибы начала изоклины и ее конца и подтверждаем их. Полученная изоклина данной фотографии приведена на рис. 6, а.

После завершения построения изоклины $\theta = 0^\circ$ переходим в слой с параметром изоклины $\theta = 10^\circ$, предварительно заморозив слой с предыдущим построением и фотографией, и т.д. В итоге получаем поле изоклин, основанное на серии нескольких фотографий с параметрами изоклин от $\theta = 0^\circ$ до $\theta = 80^\circ$.

Редактирование построения изоклины

Всегда есть возможность изменения кривизны изоклины. Для этого необходимо находиться в том слое, в котором находится редактируемая изоклина. Редактирование возможно только в ее слое. Для изменения кривизны изоклины выбираем ее слой, и на данной линии появляются опорные точки построения в виде квадратов, из которых и состоит полилиния (рис. 6, б). Определим участок

линии, который надо изменить, и выделим его. Квадрат опорной точки станет красным, а сама линия пунктирной, при этом появится возможность изменения кривизны линии.

Проделав вышеописанные действия с каждой из фотографий выполненного эксперимента и построив изоклину каждой из них, получаем поле изоклин. После этого, «заморозив» слои с фотографиями, оставляем только поле изоклин, на основе которых будет строиться поле изостат и в дальнейшем поле линий скольжения.

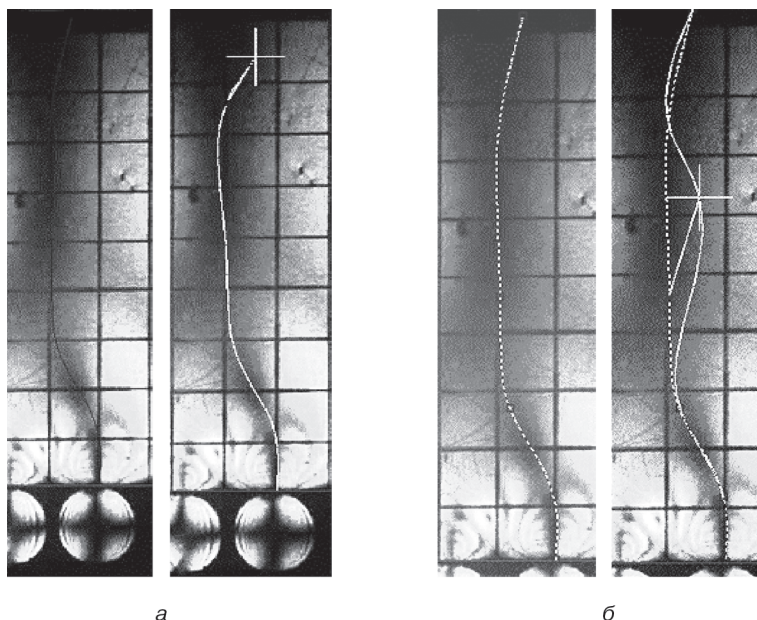


Рис. 6. Обработка экспериментальных данных фотограммы с изоклиной:
а — построение изоклины; б — редактирование изоклины
[Fig. 6. Processing experimental data of a photogram with an isocline:
а — construction of isocline; б — editing isocline]

На рисунке 7, а показано поле изоклин, построенное описанным способом при нагружении исследуемой оптической модели, имитирующем одновременное действие нормальной и тангенциальной нагрузки на передней поверхности. Распределенная нагрузка имитировалась пятью сосредоточенными силами, рассчитанными по данным работы [5]. На основе этого поля было построено поле изостат (рис. 7, б).

Изостаты (или траектории главных напряжений) — это линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением одного из главных нормальных напряжений в точках касания. Так как главные напряжения σ_1 и σ_2 в каждой точке взаимно перпендикулярны, траектории главных напряжений образуют систему ортогональных кривых. Изостаты строятся графическим путем на основании картины изоклин.

Наиболее простой способ построения изостат сводится к следующим построениям. На каждой изоклине наносится ряд штрихов, наклоненных к горизонтали под углом, равным параметру изоклины θ . Проделав эту работу для всех изо-

клин и проведя плавные кривые так, чтобы штрихи касались ее, получим изостаты одного семейства. Изостаты другого семейства строятся ортогонально к изостатам первого семейства. Таким образом, имея поле изоклин, можем найти направления главных нормальных напряжений в любой точке модели (рис. 7, б). Картина изостат в напряженной модели дает наглядное представление о характере поля напряжений. Затем по полю изостат строят поле линий скольжения (рис. 7, в) или траектории максимальных касательных напряжений. Модель на рис. 7 повернута зеркально относительно горизонтального контура зоны стружкообразования.

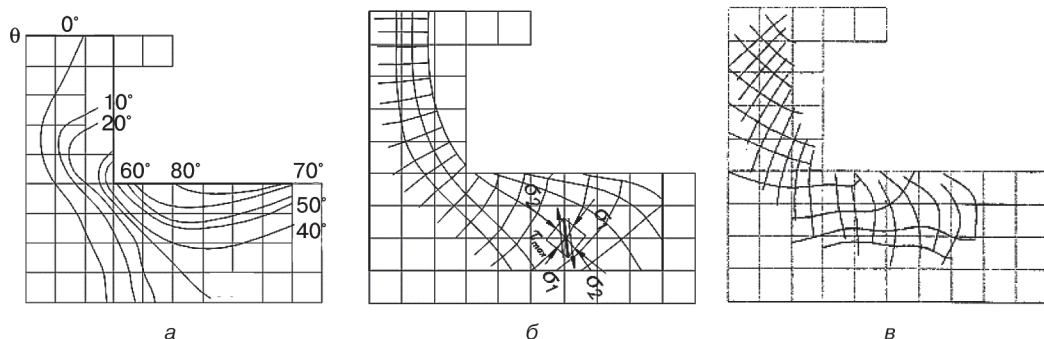


Рис. 7. Результаты обработки фотограмм нагружения зоны стружкообразования исследуемой оптической модели нормальной P_B и тангенциальной P_T нагрузкой: а — поле изоклин; б — поле изостат; в — поле линий скольжения; σ_1 , σ_2 — главные нормальные напряжения

[Fig. 7. Results of processing photograms of photoelastic model chip formation zone loaded by normal P_B and the tangential P_T loads: а — field of isoclines; б — isostatic field; в — field of slip lines; σ_1 , σ_2 — principal normal stresses]

Программа AutoCAD позволяет выполнить все вышеописанные построения, основываясь на поле изоклин, полученных из серии фотографий в ходе выполнения модельного эксперимента. Более того, компьютерный метод построения не только удобен, но и позволяет в будущем менять параметры построения или дорабатывать другие интересующие параметры.

Далее в программе выполняется построение сетки линий скольжения. Через узловые точки на сетке пересечения изостат (σ_1 и σ_2) проводят по диагонали линии скольжения или траектории максимальных касательных напряжений. При очень плотной сетке изостат полученные ломаные линии превратятся в плавные кривые линии скольжения. На рисунке 7, в изображено семейство линий скольжения, которое отражает специфику решаемой задачи для оценки прочности зоны стружкообразования.

Анализируя опыт применения разработанной методики цифровой регистрации и компьютерной обработки фотограмм в поляризованно-оптическом эксперименте, можно заключить, что значительно сокращается время выполнения собственно экспериментальной части за счет отказа от традиционной методики рисования изоклин на кальке, наложенной на матовом стекле фотокамеры установки. Кроме этого, повышается точность полей изостат и линий скольжения благодаря тому, что в исходном для их построения поле изоклин исключаются ошибки, неизбежные при ручной фиксации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Кошеленко А.С., Позняк Г.Г.* Теоретические основы и практика фотомеханики в машиностроении. М.: Граница, 2004. 296 с.
- [2] *Полетика М.Ф.* Контактные нагрузки на режущие поверхности инструмента. М.: Машиностроение, 1969. 150 с.
- [3] *Маитра Суканта, Кошеленко А.С., Позняк Г.Г.* Стенд для исследования физической модели зоны стружкообразования // Актуальные проблемы теории и практики инженерных исследований: сб. научных трудов. М.: Машиностроение, 1999.
- [4] *Кошеленко А.С., Яхья Шакиб Хамас, Позняк Г.Г.* Исследование дискретного представления зоны стружкообразования на оптической модели. Депонирована ВИНТИ. 03. 1997. № 823-В97. 8 с.
- [5] *Жедь О.В., Кошеленко А.С., Позняк Г.Г., Рогов В.А., Федоров В.Л.* Математическая и поляризационно-оптическая модели напряжений в режущем клине // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2000. № 1. С. 21–26.
- [6] *Кошеленко А.С., Зборовский С.А., Позняк Г.Г.* Методика моделирования напряженного состояния зоны стружкообразования // Проблемы теории и практики в инженерных исследованиях: сб. научных трудов. М.: АСВ, 2000. С. 22–24.
- [7] *Кошеленко А.С., Маитра Суканта, Позняк Г.Г.* Аналитическое исследование прирезцовой области стружкообразования // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2000. № 3. С. 32–38.
- [8] *Позняк Г.Г., Кошеленко А.С., Рогов В.А.* Математическая модель напряжений и деформаций в прирезцовой зоне стружки // Известия ТПУ. 2002. Т. 305. Вып. 1. С. 114–119.
- [9] *Позняк Г.Г., Кошеленко А.С.* Квазидискретная модель стружкообразования при резании // Технология металлов. 2003. № 4. С. 20–26.
- [10] *Позняк Г.Г., Кошеленко А.С.* Исследование напряжений и деформаций зерна металла на математической и поляризационно-оптической моделях // Технология металлов. 2003. № 5. С. 38–42.
- [11] *Позняк Г.Г., Кошеленко А.С., Валид Махмуд Шевах.* Физическое и математическое моделирование напряжений при резании материалов с неоднородной структурой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 13. 2004. С. 56–59.
- [12] *Позняк Г.Г., Кошеленко А.С., Валид Махмуд Шевах.* Исследование напряжений при резании материала с неоднородной структурой на физической (поляризационно-оптической) и математической моделях // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2004. № 2(9). С. 83–87.
- [13] *Позняк Г.Г., Кошеленко А.С., Валид Махмуд Шевах.* Опыт параллельного исследования на физической (поляризационно-оптической) и математической моделях напряжений в зернах квазидискретного материала (на примере синтегран) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2004. № 9(2). С. 85–89.
- [14] *Амедие В.Й., Кошеленко А.С., Позняк Г.Г.* Математическая модель контактных давлений на задней поверхности режущего клина // Физика, химия и механика трибосистем: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 5. Иваново: Изд-во ИГУ, 2006. С. 71–74.
- [15] *Амедие В.Й., Кошеленко А.С., Копылов В.В., Позняк Г.Г.* Экспериментальное исследование напряжений в зернах и межзеренных связях модели структурно-неоднородных материалов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2008. № 2. С. 48–51.
- [16] *Амедие В.Й., Кошеленко А.С., Позняк Г.Г., Рогов В.А.* Экспериментально-аналитическое исследование напряжений в межзеренных связях твердосплавной режущей пластины // СТИН. 2008. № 7. С. 17–21.
- [17] *Amedie V.I., Koshelenko A.S., Poznyak G.G., Rogov V.A.* Stress in the Intergrain Bonds of Hard-Alloy Cutting Plates // Russian Engineering Research. 2008. Vol. 28. No. 10. P. 1010–1014.

© Жедь О.В., Копылов В.В., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 20 мая 2018

Дата принятия к печати: 15 июля 2018

Для цитирования:

Жедь О.В., Копылов В.В. Применение компьютерной обработки экспериментальных данных исследования зоны стружкообразования на оптических моделях // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования.* 2018. Т. 19. № 3. С. 277–288. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-277-288

Сведения об авторах:

Жедь Ольга Викторовна — кандидат технических наук, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* фотомеханика в машиностроении, режущий инструмент. *Контактная информация:* e-mail: zhed_ov@pfur.ru

Копылов Владимир Викторович — кандидат технических наук, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* нанотехнологии, фотомеханика в машиностроении, режущий инструмент. *Контактная информация:* e-mail: kopylov_vv@rudn.university

Application of computer processing of experimental data from analysis of chip formation zone on photoelastic models

O.V. Zhed, V.V. Kopylov

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

Abstract. In the experiments carried out using photomechanical method, only the isochrome pattern is directly recorded on photoelastic models and the isoclines (lines of equal angles of inclination of the principal stresses) must be traced manually for each of the fixed values of the polarization planes. Further processing is also performed manually, isostatic lines (trajectories of principal stresses) are constructed from the isocline pattern, and the field of the slip lines, or maximum tangential stresses, is constructed from the obtained isostatic field. Such multi-step path (isoclines-isostatic lines-slip lines) containing manual processing at each stage leads to accumulation of errors. The research presented in the article largely removes these problems. In order to actualize a load similar to the one acting on the wedge front surface, a large-scale photoelastic model and a special experimental stand were developed. The scale of the model (10:1) was chosen as great as practicable from the condition of its placement in the optical field of the PPU-7 (plane polarization unit). The scheme of chip formation, the shape of the photoelastic model and its loading is given. The scheme of the stand for loading the chip formation zone of the model under study is described. The task of reducing labor intensity of the experimental part and increasing the accuracy of the obtained results was solved by using a digital camera and a specially developed technology for computer processing of photograms. Pressure diagram describes the nature of loading models in experiments. The results of the experiments were presented in the form of a series of digital photographs subjected to further computer processing, the purpose of which was to obtain isocline mesh, construct isostatic lines field, and then fields of slip lines. Analysis of the application of digital recording and computer processing of photograms significantly reduce time of

performing the experimental part by abandoning the traditional method of drawing isoclines on tracing paper. In addition, the accuracy of the fields of the isostatic and slip lines increases because in the initial for their construction isocline field errors that are unavoidable with manual fixation are eliminated.

Key words: Photomechanics, photoelastic model, chip zone, isocline, isostatic lines, slip lines

REFERENCES

- [1] Koshelenko A.S., Poznyak G.G. *Teoreticheskie osnovy i praktika fotomehaniki v mashinostroenii* [Theoretical foundations and practice of photomechanics in machine-building]. Moscow: Granitsa Publ., 2004. 296 p. (In Russ.)
- [2] Poletika M.F. *Kontaktnye nagruzki na rezhushchie poverhnosti instrumenta* [Contact loads on tool cutting surfaces]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 150 p. (In Russ.)
- [3] Maitra Sukanta, Koshelenko A.S., Poznyak G.G. *Stend dlya issledovaniya fizicheskoi modeli zony struzhkoobrazovaniya. Aktual'nye problemy teorii i praktiki inzhenernykh issledovaniy: Sb. nauchnykh trudov* [Stand for studying physical models of chip formation zone. Relevant problems in theory and practice of engineering studies: Collection of scientific studies]. Moscow: Mashinostroenie, 1999. 75–76. (In Russ.)
- [4] Koshelenko A.S., Yakhya Shakib Hamas & Poznyak G.G. *Issledovanie diskretnogo predstavleniya zony struzhkoobrazovaniya na opticheskoi modeli* [Investigation of discrete representation of chip formation zone on a photoelastic model. Deposited by VINITI]. 03. 1997. No. 823-B97. 8 p. (In Russ.)
- [5] Zhed O.V., Koshelenko A.S., Poznyak G.G., Rogov V.A. & Fedorov V.L. *Mathematic and photoelastic models of stresses in a cutting edge. RUDN Journal of Engineering Researches*. 2000. No. 1. 21–26. (In Russ.)
- [6] Koshelenko A.S., Zborovsky S.A., Poznyak G.G. *Metodika modelirovaniya napryazhennogo sostoyaniya zony struzhkoobrazovaniya. Problemy teorii i praktiki v inzhenernykh issledovaniyakh: Sb. nauchnykh trudov* [A technique for modeling stress state of chip formation zone. Problems of theory and practice in engineering research: Collection of scientific studies]. Moscow: ASV Publ., 2000. 22–24. (In Russ.)
- [7] Koshelenko A.S., Maitra Sukanta, Poznyak G.G. *Analitical investigation of the rake surface zone of chip formation. RUDN Journal of Engineering Researches*. 2000. No. 3. 32–38. (In Russ.)
- [8] Poznyak G.G., Koshelenko A.S., Rogov V.A. *Matematicheskaya model' napryazhenii i deformatsii v prireztsvoi zone struzhki* [Mathematical model of stresses and deformations in the cut-off zone of chips]. *Izvestiya TPU*. Tomsk: TPU Publ., 2002. Vol. 305. Issue 1. 114–119. (In Russ.)
- [9] Poznyak G.G., Koshelenko A.S. *Kvazidiskretnaya model' struzhkoobrazovaniya pri rezanii* [Quasidiscrete model of chip formation during cutting]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals]. 2003. No. 4. 20–26. (In Russ.)
- [10] Poznyak G.G., Koshelenko A.S. *Issledovanie napryazhenii i deformatsii zerna metalla na matematicheskoi i polarizatsionno-opticheskoi modelyakh* [Investigation of stresses and deformations of metal grain on mathematical and photoelastic models]. *Tekhnologiya metallov* [Technology of metals]. 2003. No. 5. 38–42. (In Russ.)
- [11] Poznyak G.G., Koshelenko A.S., Valid Mahmud Shevakh. *Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie napryazhenii pri rezanii materialov s neodnorodnoi strukturoi* [Physical and mathematical modeling of stresses when cutting materials with heterogeneous structure]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings: Interuniversity collection of scientific works*. Issue 13. Moscow: RUDN Publ., 2004. 56–59. (In Russ.)
- [12] Poznyak G.G., Koshelenko A.S., Valid Mahmud Shevakh. *Physical (polarization-optical) and mathematical models of stresses distribution in the cutting process of the non-homogenous material. RUDN Journal of Engineering Researches*. 2004. No. 2 (9). 83–87. (In Russ.)
- [13] Poznyak G.G., Koshelenko A.S., Valid Mahmud Shevakh. *Physical (polarization optical) and mathematical reserch studing stresses distributions in a grain of quasi-diskrete materials (for example sintegran). RUDN Journal of Engineering Researches*. 2004. No. 9 (2). 85–89. (In Russ.)

- [14] Amedie V.Y., Koshelenko A.S., Poznyak G.G. Matematicheskaya model' kontaktnykh davlenii na zadnei poverkhnosti rezhushchego klina [Mathematical model of contact pressures on the back surface of cutting wedge]. Fizika, khimiya i mekhanika tribosistem: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov. [Physics, Chemistry and Mechanics of Tribosystems: Interuniversity collection of scientific studies]. Issue 5. Ivanovo: IGU Publ., 2006. 71–74. (In Russ.)
- [15] Amedie V.Y., Koshelenko A.S., Kopylov V.V., Poznyak G.G. Experimental research of stress of grains and inter-grain bounds in a model of heterogeneous structure materials. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2008. No. 2, 48–51. (In Russ.)
- [16] Amedie V.Y., Koshelenko A.S., Poznyak G.G., Rogov V.A. Eksperimental'no-analiticheskoe issledovanie napryazhenii v mezhdunarodnykh svyazyakh tverdosplavnoi rezhushchei plastiny [Experimental-analytical study of stresses in intergrain bonds of carbide blade insert]. *Russian Engineering Research*. 2008. No. 7. 17–21. (In Russ.)
- [17] Amedie V.I., Koshelenko A.S., Poznyak G.G., Rogov V.A. Stress in the intergrain bonds of hard-alloy cutting plates. *Russian Engineering Research*. 2008. Vol. 28. No. 10. 1010–1014. (In Russ.)

Article history:

Received: May 20, 2018

Accepted: July 15, 2018

For citation:

Zhed O.V., Kopylov V.V. (2018). Application of computer processing of experimental data from analysis of chip formation zone on photoelastic models. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(3), 277–288. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-277-288

Bio Note:

Olga V. Zhed— Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: photomechanics in mechanical engineering, cutting tools. *Contact Information*: e-mail: zhed_ov@pfur.ru

Vladimir V. Kopylov— Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests*: nanotechnology, photomechanics in mechanical engineering, cutting tools. *Contact Information*: e-mail: kopylov_vv@rudn.university



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-289-298

УДК 377:378

Применение авторских программных продуктов при обучении студентов средних специальных и высших учебных заведений

А.Г. Гягяева¹, Е.Р. Кожанова²

¹ Балаковский политехнический техникум

Российская Федерация, 413857, Саратовская обл., Балаково, ул. Факел Социализма, 27

² Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Российская Федерация, 410054, Саратовская обл., Саратов, ул. Политехническая, 77

В статье представлены авторские программные продукты, используемые при обучении студентов по машиностроительным, экономическим и информационным специальностям в высших и средних специальных учебных заведениях. Для подготовки специалистов машиностроительного профиля авторами разработано два блока программ. Первый блок предназначен для машиностроительных специальностей и посвящен изучению ручного программирования при составлении управляющих программ для станков с ЧПУ, работающих в абсолютных и относительных системах координат. На основании первой программы составляется таблица координат контура детали, изготовленной из листового материала, а на основании второй программы — таблица координат контура вала (тела вращения). Второй блок программ также состоит из двух программ и посвящен изучению оценки качества продукции — «Диаграмма Парето» и «Программа вычисления статистических показателей для контроля качества выпускаемой продукции». Данные программы предназначены для построения диаграмм Парето и карт Шухарта на основании загружаемых данных, позволяющих изучить не только основные понятия, но и научиться сравнивать полученные результаты и делать выводы о качестве продукции. Следующая программа «Анализ и синтез логических систем управления» предназначена для ИТ-специалистов, но может применяться для любых специальностей, так как дает общие представления о работе логических элементов, а также о задачах анализа и синтеза. Первые три задания позволяют изучить логические элементы, а последнее задание является задачей синтеза логических систем управления и представляет собой виртуальный прибор для генерации исходных данных для задачи синтеза. Последняя программа «Разработка программного продукта для составления маршрутов грузоперевозок на основе алгоритма Свира» разработана для подготовки специалистов экономического профиля и позволяет на основе загружаемых данных строить карты-схемы зон обслуживания и план выполнения заказов. Вышеперечисленные авторские программные продукты позволяют получить знания и умения при изучении конкретных дисциплин, экономия время и ресурсы преподавателя, а также повысить интерес к обучению у студентов.

Ключевые слова: программный продукт, обучение студентов, станок с ЧПУ, логическая схема, статистические показатели, алгоритм Свира, диаграмма Парето

В России активно предпринимаются шаги, направленные на развитие информационных технологий и их внедрение в повседневную жизнь, в том числе для обучения будущих специалистов, при этом используются активные и интерак-

тивные методы, в том числе виртуальные лаборатории, математические пакеты и авторские программные продукты. Для освоения нового материала и получения навыков, связанных с будущей профессией, разрабатываются и применяются в учебном процессе авторские программные продукты, направленные на изучение конкретных дисциплин и упрощающие их освоение студентами.

Рассмотрим авторские программные продукты, применяемые при обучении студентов машиностроительного, информационного и экономического профилей в средних специальных и высших учебных заведениях.

Для подготовки специалистов машиностроительного профиля авторами разработано два блока программ.

Первый блок программ, состоящий из двух программ, предназначен для изучения ручного программирования при составлении управляющих программ для станков с ЧПУ, работающих в абсолютных и относительных системах координат.

Первая программа «Отрисовка контура детали в абсолютной и относительной системах координат» [1] (рис. 1) позволяет составить таблицу координат для контроля опорных точек и последующего создания управляющей программы для станков с ЧПУ. Программа имеет две вкладки: в первой вкладке контур детали строится в абсолютной системе координат, а во второй — в относительной системе координат [2].

Вторая программа «Отрисовка контура обрабатываемых поверхностей вала» [3] (рис. 2) является логическим продолжением первой и позволяет составить таблицу координат контура вала (тела вращения) для контроля опорных точек и последующего создания управляющей программы для станков с ЧПУ [2].

Второй блок программ также состоит из двух программ и посвящен оценке качества продукции.

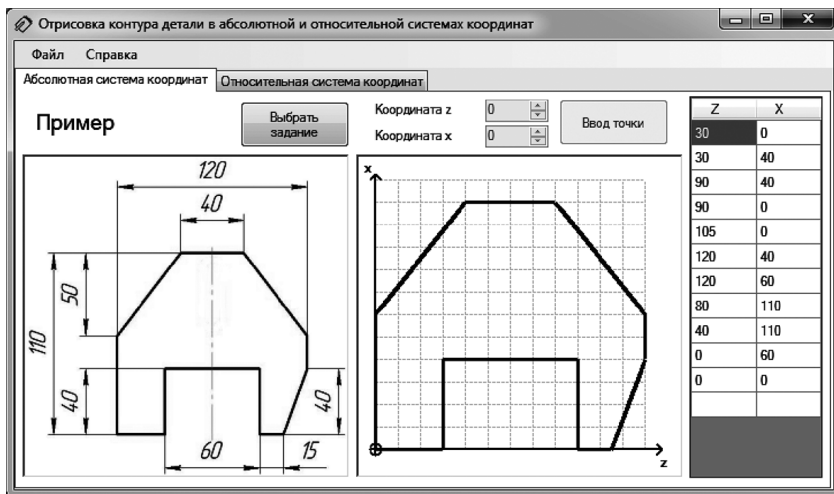
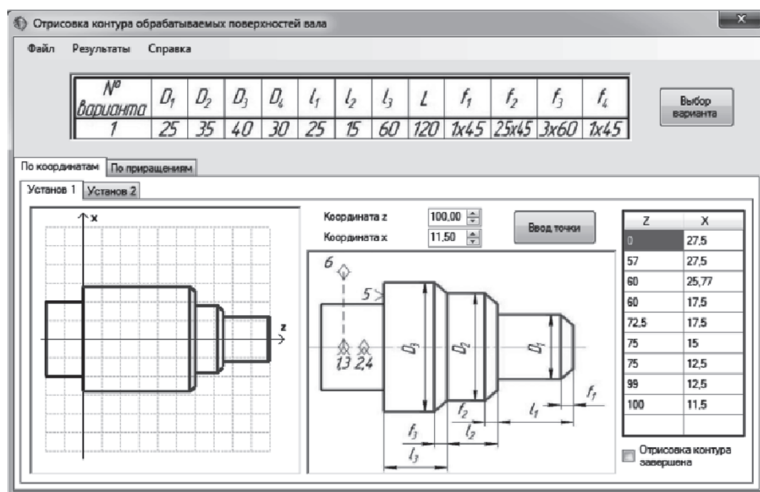
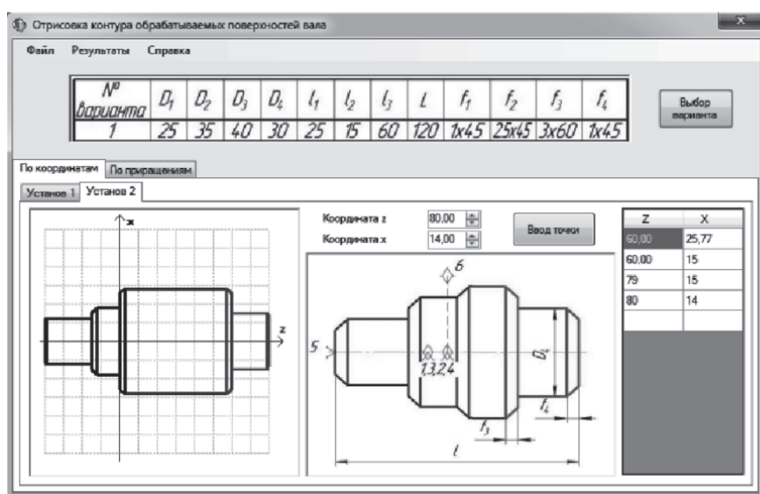


Рис. 1. Программа «Отрисовка контура детали в абсолютной и относительной системах координат» [4]

[Fig. 1. Example of working with “Contouring parts in absolute and relative coordinate systems” program [4]



а



б

Рис. 2. Программа «Отрисовка контура обрабатываемых поверхностей вала» в абсолютной системе координат:

а — Установ 1; б — Установ 2

[Fig. 2. Example of working with “Contouring shaft surfaces to be machined” program in absolute coordinate system: а — Setup 1; б — Setup 2]

Первая программа «Диаграмма Парето» [5] из данного блока позволяет оценить качество продукции на основе загружаемых данных (рис. 3, а) и строить диаграмму Парето с кривой накопленного дефекта (рис. 3, б).

Вторая программа «Программа вычисления статистических показателей для контроля качества выпускаемой продукции» [6] (рис. 4) позволяет построить контрольную карту Шухарта и вычислить статистические показатели загружаемых данных из *txt*-файлов, что позволяет своевременно выявить нестабильность процесса и оценить качество выпускаемой продукции, сформулировав выводы о дальнейшем управлении технологическим процессом.

Диagramма Парето

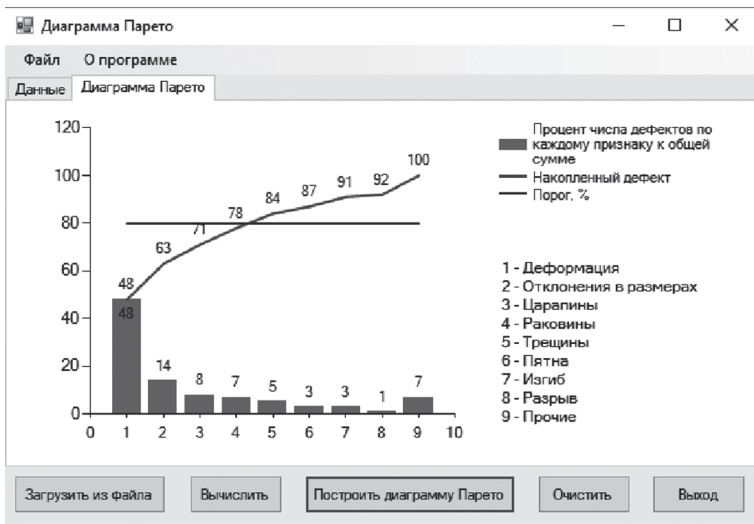
Файл О программе

Данные Диagramма Парето

	Типы дефектов	Число дефектов	Накопленная сумма числа дефектов	Процент числа дефектов	Накопленный дефект
1	Деформация	162	162	48	48
2	Отклонения в размерах	48	210	14	63
3	Царапины	29	239	8	71
4	Раковины	24	263	7	78
5	Трещины	17	280	5	84
6	Пятна	13	293	3	87
7	Изгиб	11	304	3	91
8	Разрыв	4	308	1	92
9	Прочие	25	333	7	100
*		333		100	

Загрузить из файла Вычислить Построить диаграмму Парето Очистить Выход

а



б

Рис. 3. Примеры задания 3(а) и задания 4(б) программы «Диagramма Парето»
 [Fig. 3. Example of working with “Pareto chart” program: а — Task 3; б — Task 4]

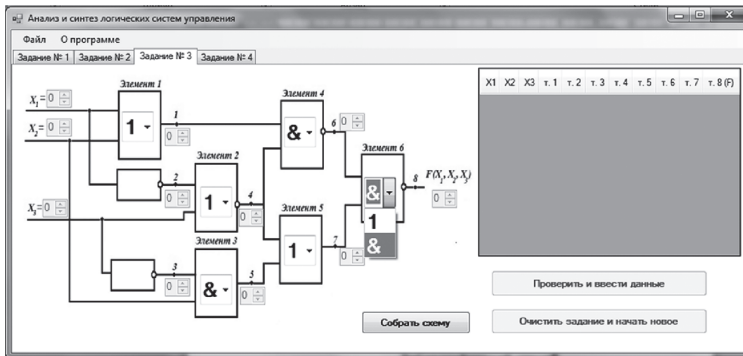
Обе программы позволяют изучить не только основные понятия оценки качества продукции, но и сравнивать полученные результаты, делая выводы о качестве полученной продукции.

Программа «Анализ и синтез логических систем управления» [4] может применяться для подготовки специалистов всех направлений, в первую очередь она предназначена для подготовки ИТ-специалистов и состоит из четырех заданий. Первое задание позволяет отработать задачу анализа логической системы управления, составленную только из элементов И и ИЛИ. Второе задание позволяет

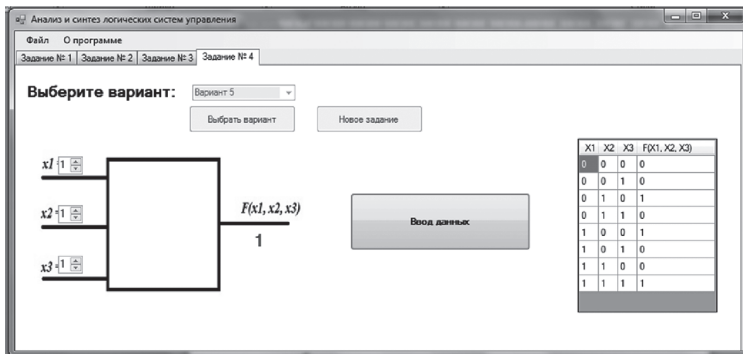
решить задачу анализа логической системы управления из логических элементов НЕ, И—НЕ и ИЛИ—НЕ, а третье задание закрепляет знания, так как задача анализа рассматривается для логической системы управления, состоящей из всех вышеперечисленных логических элементов (рис. 5, а). Четвертое задание — задача синтеза логических систем управления представляет собой виртуальный прибор для генерации в виде модели «черного ящика» исходных данных для данной задачи (рис. 5, б).



Рис. 4. Программа вычисления статистических показателей для контроля качества выпускаемой продукции
[Fig. 4. Program for calculating statistical parameters for product quality control]



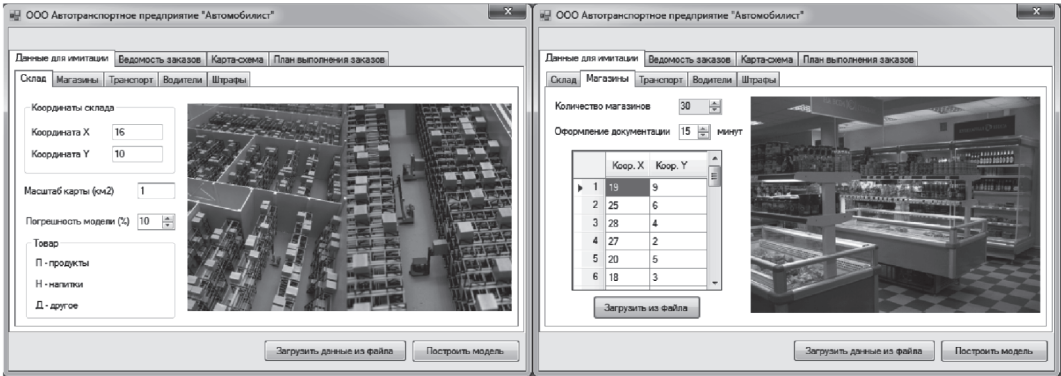
а



б

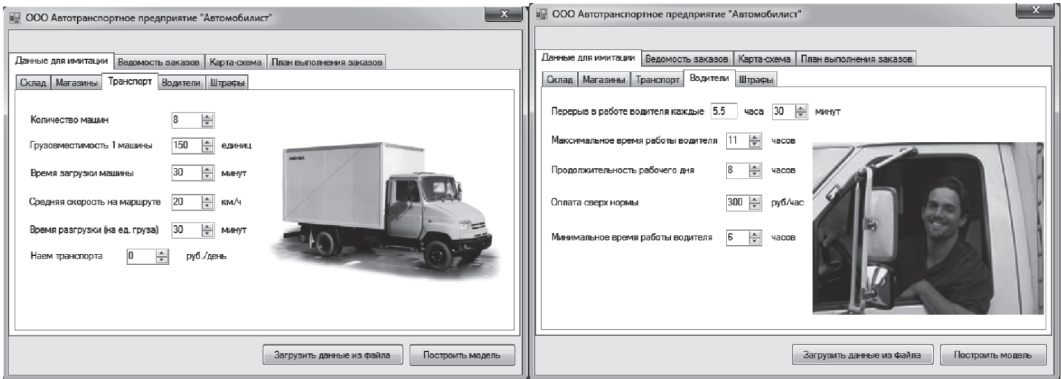
Рис. 5. Примеры задания 3(а) и задания 4(б) программы «Анализ и синтез логических систем управления»

[Fig. 5. Example of working with “Analysis and design of logic control systems”: а — task 3; б — task 4]



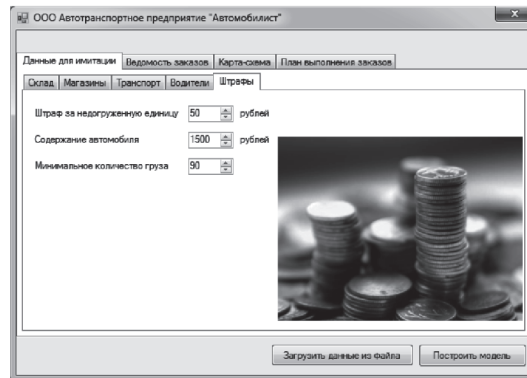
а

б



в

г



д

Рис. 6. Ввод данных в программу «Разработка программного продукта для составления маршрутов грузоперевозок на основе алгоритма Свира» [7]

[Fig. 6. Inputting data into “Development of the software product for routing cargo on the basis of the Svir algorithm” program [7]]

Последняя разработанная авторами программа «Разработка программного продукта для составления маршрутов грузоперевозок на основе алгоритма Свира» [7] предназначена для студентов экономического профиля она позволяет составлять маршруты грузоперевозок, снижая временные затраты при формировании

маршрутов грузоперевозок и повышая качество работы пользователя за счет рационального использования рабочего времени диспетчера.

Ввод данных начинается с характеристик предприятия, которые необходимы для построения модели, и реализуется во вкладке *Данные для имитации*. Данная вкладка представляет собой пять подразделов:

— вкладка *Склад* (рис. 6, а) содержит данные о координатах склада, масштаб карты, погрешность модели для имитации и характеристики товара;

— вкладка *Магазины* (рис. 6, б) включает в себя информацию о количестве магазинов в модели, об их координатах и о времени на оформление документации при разгрузке товаров (в минутах). Предусмотрена загрузка координат из файла;

— вкладка *Транспорт* (рис. 6, в) позволяет задавать характеристики машин: количество машин предприятия, грузоподъемность одной машины, время загрузки машины (в минутах), средняя скорость на маршруте (км/час), время разгрузки единицы товара (в минутах) и стоимость наемного транспорта;

— вкладка *Водители* (рис. 6, г) показывает время перерыва в работе водителя, максимальное и минимальное время работы водителя, продолжительность рабочего дня и норму оплаты за выполнение работы сверх положенного времени;

— вкладка *Штрафы* (рис. 6, д) включает следующие поля: штраф за незагруженную единицу товара, штраф за содержание автомобиля и минимальное количество грузов в автомобиле.

Результатом работы программы является карта-схема зоны обслуживания (рис. 7, а) и план выполнения заказов (рис. 7, б).

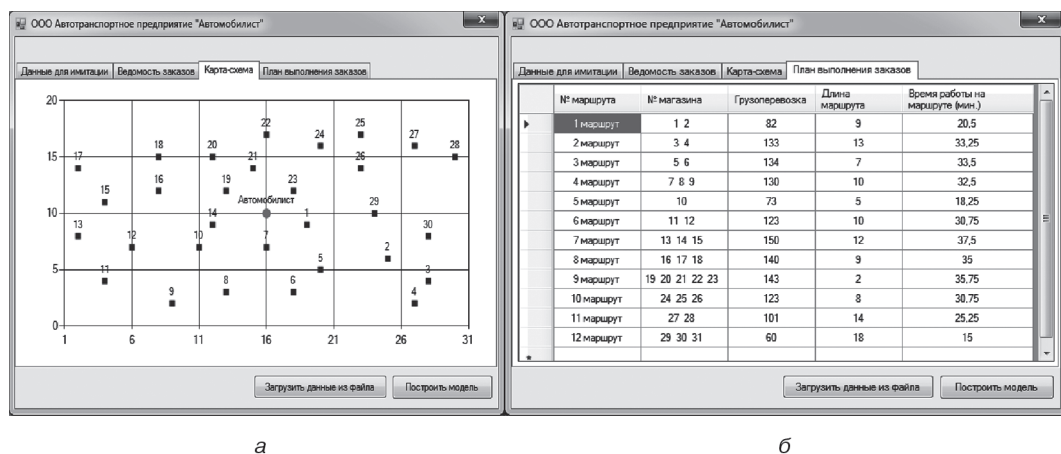


Рис. 7. Карта-схема зоны обслуживания (а) и план выполнения заказов (б)
[Fig. 7. Schematic map of operating range (a) and task schedule (б)]

Вышеперечисленные авторские программные продукты применяются при обучении студентов машиностроительного, информационного и экономического профилей средних специальных и высших учебных заведений (Балаковский институт техники, технологии и управления, ГАПОУ СО «Балаковский политехнический техникум», Саратовский государственный технический университет (СГТУ) им. Ю.А. Гагарина), повышая интерес к обучению у студентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Гягяева А.Г., Сорокина Л.А., Кожанова Е.Р.* Автоматизация отрисовки контура детали для подготовки управляющих программ для ЧПУ // Молодой ученый. 2013. № 12. С. 115—117.
- [2] *Кожанов Р.В., Гягяева А.Г.* Автоматизация отрисовки контура детали для подготовки управляющих программ для ЧПУ // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. научных трудов 3-й международной молодежной научно-практической конференции: в 2 т. 2016.
- [3] *Гягяева А.Г., Сорокина А.Г., Кожанова Е.Р.* К вопросу отрисовки контура поверхностей вала // Молодой ученый. 2014. № 1. С. 81—84.
- [4] *Kozhanov R.V., Kozhanova E.R., Tkachenko I.M., Zaharov A.A.* The logical design process automation control systems // Conference Proceedings — 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2014. 2014. P. 153—158.
- [5] *Гягяева А.Г., Кожанова Е.Р., Сорокина Л.А.* Программа построения диаграммы парето для оценки качества продукции // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сб. научных трудов 3-й международной молодежной научно-практической конференции: в 2 томах. 2016.
- [6] *Кожанов Р.В., Артемова А.Д., Гягяева А.Г., Кожанова Е.Р., Сорокина Л.А.* Построение контрольных карт Шухарта с применением Mathcad и Matlab // Актуальные вопросы технических наук: материалы III Междунар. науч. конф. (Пермь, апрель 2015 г.). Пермь: Зebra, 2015.
- [7] *Гягяева А.Г., Кожанова Е.Р.* Разработка программного продукта для составления маршрутов грузоперевозок на основе алгоритма Свира // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2016. Т. 2. № 2. С. 37—44.

© Гягяева А.Г., Кожанова Е.Р., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 22 марта 2018

Дата принятия к печати: 10 июля 2018

Для цитирования:

Гягяева А.Г., Кожанова Е.Р. Применение авторских программных продуктов при обучении студентов средних специальных и высших учебных заведений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 289—298. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-289-298

Сведения об авторах:

Гягяева Александра Геннадиевна — преподаватель, Балаковский политехнический техникум. *Область научных интересов:* программный продукт, обучение студентов, станок с ЧПУ, логическая схема, статистические показатели. *Контактная информация:* e-mail: gyagaeva@mail.ru.

Кожанова Евгения Романовна — кандидат технических наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств, Институт электронной техники и машиностроения, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. *Область научных интересов:* систем программный продукт, обучение студентов, станок с ЧПУ, логическая схема, статистические показатели. *Контактная информация:* e-mail: jubimzh@yandex.ru

Use of author-developed software products for training college and university students

A.G. Gyagyaeva, E.R. Kozhanova

Balakovo Polytechnic College

27, *Fakel Socializma str., Balakovo, Saratov region, 413857, Russian Federation*

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

77, *Polytechnicheskaya str., Saratov, Saratov region, 410054, Russian Federation*

Abstract. The article presents the author-developed software products that are used for training college and university students in engineering, economy and information fields. For training mechanical engineering professionals, the authors have developed two sets of programs. The first set is designed for mechanical engineering majors and is dedicated to studying manual programming for developing control programs for CNC machine tools, operating in absolute and relative coordinate systems. On the basis of the first program, a table of contour coordinates of a part made from sheet material is prepared, and on the basis of the second program — a table of contour coordinates of a shaft (rotary body) is prepared. The second set of programs also consists of two programs dedicated to product quality assessment — “Pareto Chart” and “Program for calculating statistical parameters for product quality control”. These programs are designed to construct Pareto and Shewhart charts based on the loaded data, allowing to learn not only basic concepts, but also learn how to compare results and draw conclusions about product quality. The next program “Analysis and design of logic control systems” is intended for Information Technology professionals, but can be applied to any field, as it gives a general picture of how logic elements operate, as well as the tasks of analysis and design. The first three tasks allow to learn logic elements, and the last task is the problem of designing logic control systems and presents a virtual device for generating input data for the design problem. The program “Development of the software product for routing cargo on the basis of the Svir algorithm” is developed for training professionals of economic specialty and allows to build maps of operating areas and task schedules on the basis of the loaded data. The above author-developed products allow the user to obtain knowledge and skills in studying specific disciplines, saving time and resources for the teacher, and increase interest in learning among students.

Key words: software, training students, CNC machine, logic system, statistics, Svira algorithm, Pareto chart

REFERENCES

- [1] Gyagyaeva A.G., Sorokin L.A., Kozhanova E.R. Avtomatizacija otrisovki kontura detail dlja podgotovki upravljajushchih program dlja ChPU [Automation of part contouring for developing control programs for CNC]. *Young scientist*. 2013. No. 12. 115–117. (In Russ.)
- [2] Kozhanov R.V., Gyagyaeva A.G. Avtomatizacija otrisovki kontura detail dlja podgotovki upravljajushchih program dlja ChPU [Automation of part contouring for developing control programs for CNC]. *Product Quality: control, management, improvement, planning, scientific papers of the 3rd international youth scientific-practical conference: in 2 volumes*. 2016. 337–341. (In Russ.)
- [3] Gyagyaeva A.G., Sorokin L.A., Kozhanova E.R. K voprosu otrisovki kontura poverhnosti vala [In addition to contouring surfaces of shafts]. *Young scientist*. 2014. No. 1. 81–84. (In Russ.)
- [4] Kozhanov R.V., Kozhanova E.R., Tkachenko I.M., Zaharov A.A. The logical design process automation control systems. *Conference Proceedings — 2014 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2014*. 2014. 153–158.
- [5] Kozhanov R.V., A.G. Gyagyaeva, Kozhanova E.R., Sorokina L.A. Programma postroenija diagrammy pareto dlja ocenki kachestva produkcii [Program for constructing Pareto chart for

- product quality assessment]. *Product Quality: control, management, improvement, planning. Collection of scientific papers of the 3rd international young scientific-practical conference: in 2 volumes.* 2016. 342—346 (In Russ.)
- [6] Kozhanov R.V., Artemov A.D., Gyagyaeva A.G., Kozhanova E.R., Sorokina L.A. Postroenie kontrol'nyh kart Shuharta s primeneniem Mathcad I Matlab [Constructing Shewhart charts with Mathcad and Matlab]. *Actual problems of technical sciences: materials of the III international scientific Conference (Perm, April 2015).* Perm: Zebra Publ., 2015. 20—25. (In Russ.)
- [7] Gyagyaeva A.G., Kozhanova E.R. Razrabotka programmogo product dlya sostavleniya marshrutov gruzoperevozok na osnove algoritma Svira [Development of the software product for routing cargo on the basis of the Svir algorithm]. *Vestnik nauki i obrazovaniya severozapada Rossii [Bulletin of science and education of North-West Russia].* 2016. Vol. 2. No. 2. 37—44. (In Russ.)

Article history:

Received: March 22, 2018

Accepted: July 10, 2018

For citation:

Gyagyaeva A.G., Kozhanova E.R. (2018). Use of author-developed software products for training college and university students. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(3), 289—298. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-289-298

Bio note:

Aleksandra G. Gyagyaeva — College instructor, Balakovo Polytechnic College. *Research interests:* software, training students, CNC machine, logical system, statistics. *Contact information:* e-mail: gyagaevaa@mail.ru

Evgeniya R. Kozhanova — Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Electronic Devices department, Institute of Electrical and Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. *Research interests:* software, training students, CNC machine, logical system, statistics. *Contact information:* e-mail: ljubimzh@yandex.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-299-316

УДК 624.04

Вывод и анализ методик расчета центрально-сжатых стальных стержней, заложенных в различные нормативные документы

И.Д. Аникеев, А.В. Голиков

Волгоградский государственный технический университет
Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

В статье описаны принципы работы центрально-сжатых стержней и аналитические модели, положенные в основу методик их расчета в действующих нормативных документах стран СНГ и Европы. Приведено приближенное решение задачи о сжатии упругого стержня силой, приложенной с эксцентриситетом, и получены аналитические зависимости для определения коэффициента устойчивости по результатам решения аналитической задачи и по результатам применения нормативных методик. По результатам решения задачи механики приведено решение для коэффициента устойчивости при центральном сжатии, который представляет собой отношение напряжения от осевого сжатия к пределу текучести стали, при котором возникает фибровая текучесть крайних волокон поперечного сечения. При получении решения для коэффициента устойчивости при центральном сжатии обосновано, что ясность получения решения достигается введением вместо числовых значений числа π . Указано, что причиной смещения значения относительного эксцентриситета от идеального решения на 0,2 является невозможность потери устойчивости при малых гибкостях стержня. Обосновано, что нормативные методы расчета, заложенные в Еврокод и Строительные правила России, несмотря на различие в определении условной гибкости, имеют единую физическую природу и их отличие состоит лишь в разных подходах к определению случайного эксцентриситета. Изложены и разобраны нормативные подходы к вычислению относительного эксцентриситета, входящего в коэффициент устойчивости, и описан его физический смысл. Раскрыта природа относительного эксцентриситета, вошедшего в европейские и отечественные нормы, и указана связь относительного эксцентриситета с несовершенствами формы и типа сечения элементов. Раскрыта природа фактора несовершенства по EN 1993-1-1:2005, зависящего от начальных несовершенств, формы сечения и технологии изготовления стержня, обосновано применение аппроксимирующей линейной функции, которая отражает технологический фактор точности изготовления элементов и неизбежно возникающих несовершенств. Раскрыта природа коэффициентов несовершенства α и β , вошедших в отечественные нормы проектирования стальных конструкций.

Ключевые слова: устойчивость, стальной стержень, центральное сжатие, нормативные методы, относительный эксцентриситет

Введение

В последние два десятилетия стремительно растет уровень взаимодействия в технической сфере между странами Востока и Запада. Борьба за рынки сбыта

технической продукции приводит к необходимости гармонизации различных нормативных документов. Научно-технические школы по проектированию строительных конструкций различных стран формировались в различных условиях, что привело к отдельным расхождениям в методах расчета конструкций. При выборе технической продукции покупатель руководствуется в первую очередь минимальными затратами стоимости конструкций в деле. На итоговую стоимость конструкций оказывает влияние комплекс факторов, одним из основных факторов являются размеры сечений, заложенных в проекте на строительство объекта. Треть общего объема строительных металлических конструкций работает при действии центрально-приложенной нагрузки. Расчет центрально-нагруженных сжатых стержней выполняется в недопущении потери устойчивости продольной оси стержня. В современной отечественной нормативной и научно-технической литературе приводятся таблицы и формулы по определению коэффициента устойчивости при центральном сжатии стального стержня, однако их происхождение не раскрывается. В данной работе определена природа основных зависимостей, положенных в различные методики расчета центрально-сжатых стержней.

Анализ литературы

Анализ научно-технической и нормативной литературы в области расчета стальных конструкций показал отсутствие подробной структурированной информации по выводу методики расчета центрально-сжатых и внецентренно-сжатых стержней.

Задача об устойчивости упругого стержня под действием осевой сжимающей силы впервые была решена Л. Эйлером в работе [1. С. 491—492]. Это решение приведено в многочисленной литературе по устойчивости стержней [2. С. 12—13; 3. С. 25—29; 4. С. 77—79; 5. С. 5—9; 6. С. 17—20]. Однако натурные испытания показали, что это решение не применимо для реальных стальных стержней, что связано с неизбежными искривлениями оси элемента в процессе изготовления и транспортировки и неточностями центровки в процессе монтажа. В связи с этим были получены различные решения для стержня под действием осевой сжимающей силы, приложенной с эксцентриситетом [2. С. 109—111; 3. С. 66—68; 4. С. 190; 5. С. 108—110; 6. С. 67—69].

Следует особо выделить работу Н.С. Стрелецкого [5], в которой подробно освещены как теоретические, так и эмпирические стороны вопроса устойчивости стальных стержней.

В нормативном документе по расчету стальных конструкций СП 16.13330.2017 [7] приведены исключительно расчетные формулы [7. С. 11] и таблицы [7. С. 114] для случая центрального сжатия. В предыдущих редакциях СП 16.13330.2011 [8] и СНиП II-23-81* [9] также отсутствуют примечания об исследованиях, предшествующих разработке данных методик. В пособии к СНиП II-23-81* [10. С. 17] приводятся сведения о том, что табулированные значения коэффициента устойчивости при центральном сжатии были получены из решения задачи механики об упругом стержне под действием внецентренно-приложенной продольной силы.

В зарубежной нормативной литературе, например в нормах EN 1993-1-1 [6] также приведены расчетные формулы [11. С. 57], составляющие методику расчета центрально-нагруженных стальных стержней, а в многочисленных пособиях, например [12. С. 54–55] частично раскрывается вывод этой формулы.

Цель исследования: раскрыть физический смысл работы центрально-сжатых стержней и принятых аналитических моделей, положенных в основу методик их расчета в действующих нормативных документах стран СНГ и Европы.

Задачи исследования:

- 1) получить аналитическое решение задачи механики в виде формулы для расчета коэффициента устойчивости при центральном сжатии;
- 2) из аналитического решения получить формулы расчета по нормативным методикам EN 1993-1-1:2005 и СП 16.13330.2017 и выполнить их сравнение;
- 3) выяснить физический смысл относительного эксцентриситета по нормативным методикам EN 1993-1-1:2005 и СП 16.13330.2017 и провести их сравнение.

Решение задачи механики

Рассматривается шарнирно-закрепленный на концах стержень, к которому приложена продольная сила с эксцентриситетом. Расчетная схема задачи представлена на рис. 1. Решение данной задачи изложено, к примеру, в [4. С. 46; 13. С. 426].

Изгибающий момент в поперечном сечении стержня при действии продольной силы с эксцентриситетом выражается следующим образом:

$$M = N(e + f), \quad (1)$$

где N — продольная сила в элементе; e — эксцентриситет приложения продольной силы; f — прогиб стержня от продольной силы приложенной с эксцентриситетом.

Анализируя уравнение (1), можно сделать вывод, что это рекурсивное уравнение, так как, чтобы найти изгибающий момент M , необходимо знать прогиб f , который определяется изгибающим моментом M .

Известно, что принцип суперпозиции не применим к нелинейным системам, к которым, в частности, относится представленная задача. Вследствие этого поиск решения ведем в приближенном виде.

Прогиб стержня в уравнении (1) можно представить как

$$f = f_0 + \Delta f, \quad (2)$$

где f_0 — прогиб стержня от изгибающего момента вызванного эксцентриситетом; Δf — прогиб стержня от действия продольной силы.

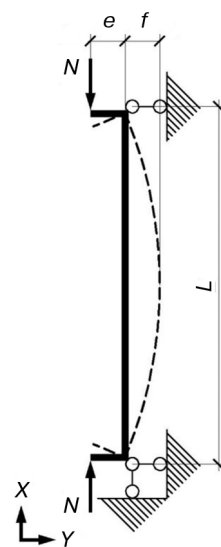


Рис. 1. Расчетная схема
[Fig. 1. Analytical scheme]

Приближенное дифференциальное уравнение изогнутой оси стержня в предположении малой кривизны изогнутой оси выражается следующим образом:

$$\frac{M}{EI} = f'' = \frac{d^2 y}{dx^2}, \quad (3)$$

где M — изгибающий момент в поперечном сечении; E — модуль упругости элемента; I — момент инерции поперечного сечения.

Рассматривая совместно уравнения (1–3), получаем:

$$\left. \begin{aligned} EI \cdot f'' &= -N \cdot (e + f) \\ EI \cdot f_0'' &= -N \cdot e \\ f &= f_0 + \Delta f \end{aligned} \right\} \rightarrow EI \cdot \Delta f'' = -N \cdot f. \quad (4)$$

Приближенно описывая изогнутую ось стержня синусоидой, получаем:

$$\Delta f(x) = \Delta f \cdot \sin\left(\frac{\pi}{l} x\right), \quad \Delta f''(x) = -\frac{\pi^2}{l^2} \cdot \Delta f \cdot \sin\left(\frac{\pi}{l} x\right).$$

Приближенный момент в середине пролета стержня:

$$\Delta f''(x) = -\frac{\pi^2}{l^2} \cdot \Delta f. \quad (5)$$

Рассматривая совместно уравнения (4), (5), получаем:

$$-EI \cdot \frac{\pi^2}{l^2} \cdot \Delta f = -N \cdot f, \quad \frac{\pi^2}{l^2} \cdot \Delta f = \frac{N}{EI} \cdot f, \quad \frac{\pi^2}{l^2} \cdot (f - f_0) = \frac{N}{EI} \cdot f;$$

$$f - f_0 = \frac{N}{EI} \cdot \frac{l^2}{\pi^2} \cdot f, \quad f \left(1 - \frac{N}{EI} \cdot \frac{l^2}{\pi^2}\right) = f_0, \quad f = \frac{f_0}{\left(1 - \frac{N}{EI} \cdot \frac{l^2}{\pi^2}\right)}.$$

Прогиб стержня при действии продольной силы с эксцентриситетом, преобразуя вышеизложенное решение, выражается следующим образом:

$$f = f_0 \frac{1}{1 - \frac{N}{N_3}}, \quad (6)$$

где f_0 — прогиб стержня от изгибающего момента, вызванного эксцентриситетом; N — продольная сила; N_3 — критическая продольная сила по Эйлеру.

Уравнение напряжений при совместном действии продольной силы с изгибающим моментом с учетом прогиба стержня от продольной силы (6) примет следующий вид:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = \frac{N}{A} + \frac{N}{W} \left(\frac{e}{1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_3}} \right) = \frac{N}{A} \left(1 + \frac{A}{W} \frac{e}{1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_3}} \right) = \sigma_0 \left(1 + m \frac{1}{1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_3}} \right),$$

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + m \frac{1}{1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_3}} \right). \quad (7)$$

Напряжение от осевого сжатия, при котором возникает фибровая текучесть, после преобразования уравнения (7) примет следующий вид:

$$\sigma_0 = \sigma_3 \left(1 - m \frac{\sigma_0}{R_y - \sigma_0} \right), \quad (8)$$

где σ_0 — напряжение от осевого сжатия N/A ; σ_3 — критическое напряжение по Эйлеру; m — относительный эксцентриситет осевой силы; R_y — предел текучести стали

Преобразуя полученное уравнение (8), получаем:

$$\sigma_0 = \sigma_3 - m \frac{\sigma_3 \cdot \sigma_0}{R_y - \sigma_0} = 0,$$

$$(\sigma_0 - \sigma_3)(R_y - \sigma_0) = -m \cdot \sigma_3 \cdot \sigma_0,$$

$$(\sigma_0 \cdot R_y) - (\sigma_0 \cdot \sigma_0) - (\sigma_3 \cdot R_y) + (\sigma_3 \cdot \sigma_0) + m(\sigma_3 \cdot \sigma_0) = 0,$$

$$\sigma_0^2 - \sigma_0(\sigma_3(1 + m) + R_y) + \sigma_3 R_y = 0,$$

$$\left(\frac{\sigma_0}{R_y} \right)^2 - \frac{\sigma_0}{R_y} \left(\frac{\sigma_3}{R_y} (1 + m) + 1 \right) + \frac{\sigma_3}{R_y} = 0. \quad (9)$$

Соотношение предела текучести R_y и критического напряжения по Эйлеру σ_3 представляет собой квадрат условной гибкости λ :

$$\frac{\sigma_3}{R_y} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 R_y} \rightarrow \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{R_y}{E}}; \quad \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{R_y}{E}}. \quad (10)$$

Рассматривая совместно уравнения (9), (10), получаем квадратное уравнение с корнями в виде коэффициента устойчивости φ , являющегося соотношением напряжения от простого сжатия σ_0 , при котором достигается фибровая текучесть, и предела текучести R_y .

$$\varphi^2 \lambda^2 - \varphi(1 + m + \lambda^2) + 1 = 0. \quad (11)$$

Коэффициент устойчивости при центральном сжатии φ , являясь решением квадратного уравнения (11), будет определяться в виде

$$a = \lambda^2, b = -(1 + m + \lambda^2), c = 1,$$

$$\varphi = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{(1 + m + \lambda^2) - \sqrt{(1 + m + \lambda^2)^2 - 4\lambda^2}}{2\lambda^2},$$

$$\varphi = \frac{(1 + m + \lambda^2) - \sqrt{(1 + m + \lambda^2)^2 - 4\lambda^2}}{2\lambda^2}. \quad (12)$$

Решая и преобразовывая уравнение (12), приводим его к простому виду:

$$\varphi = \frac{1}{F + \sqrt{F^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad (13)$$

$$F = \frac{1}{2}(1 + m + \bar{\lambda}^2). \quad (14)$$

Таким образом, решение механической задачи в виде коэффициента устойчивости φ является отношением напряжения от осевого сжатия σ_0 к пределу текучести R_y , при котором возникает фибровая текучесть крайних волокон поперечного сечения.

Получение решения по EN 1993-1-1:2005

Преобразовывая выражение (11), получаем выражение в виде

$$\bar{\lambda}_{\text{EN}} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \varphi^2 - \varphi \left(\frac{1 + m + \bar{\lambda}_{\text{EN}}^2}{\bar{\lambda}_{\text{EN}}^2} \right) + \frac{1}{\bar{\lambda}_{\text{EN}}^2} = 0,$$

$$a = 1, b = \frac{1}{2} \frac{(1+m+\bar{\lambda}_{EN}^2)}{\bar{\lambda}_{EN}^2}, c = \frac{1}{\bar{\lambda}_{EN}^2}, d = \sqrt{b^2 - c^2};$$

$$\frac{1}{\Phi_{EN}} = \frac{1}{b-d} = \frac{1}{b-d} \frac{b+d}{b+d} = \frac{b+d}{b^2-d^2} = \frac{b+\sqrt{b^2-c^2}}{b^2-\sqrt{b^2-c^2}^2} = \frac{b+\sqrt{b^2-c^2}}{c^2};$$

$$\frac{1}{\Phi_{EN}} = \bar{\lambda}_{EN}^2 \left(\frac{1}{2} \frac{1+m+\bar{\lambda}_{EN}^2}{\bar{\lambda}_{EN}^2} \right) + \sqrt{\bar{\lambda}_{EN}^4 \left(\frac{1}{2} \frac{1+m+\bar{\lambda}_{EN}^2}{\bar{\lambda}_{EN}^2} \right)^2 - \frac{\bar{\lambda}_{EN}^4}{\bar{\lambda}_{EN}^2}};$$

$$\Phi = \frac{1}{2}(1+m+\bar{\lambda}_{EN}^2);$$

$$\Phi_{EN} = \frac{1}{\Phi_{EN} + \sqrt{\Phi_{EN}^2 - \bar{\lambda}_{EN}^2}}, \quad (15)$$

$$\Phi_{EN} = \frac{1}{2}(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{EN} - 0, 2) + \bar{\lambda}_{EN}^2). \quad (16)$$

Получение решения по СП 16.13330.2017

Учитывая, что для упрощения вычисления условной гибкости λ в отечественных нормативных документах из выражения (10) было удалено число пи, преобразуем выражения (10) и (12) к виду

$$\bar{\lambda}_{СП} = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}}, \Phi_{СП} = \frac{\pi^2 \left(1+m+\frac{\bar{\lambda}_{СП}^2}{\pi^2} \right) - \sqrt{\pi^4 \left(1+m+\frac{\bar{\lambda}_{СП}^2}{\pi^2} \right)^2 - \pi^4 4 \frac{\bar{\lambda}_{СП}^2}{\pi^2}}}{2\bar{\lambda}_{СП}^2};$$

$$\delta = \pi^2 \left(1+m+\frac{\bar{\lambda}_{СП}^2}{\pi^2} \right) = \pi^2(1+m) + \bar{\lambda}_{СП}^2, \Phi_{СП} = \frac{1}{2} \frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - 4\pi^2 \bar{\lambda}_{СП}^2}}{\bar{\lambda}_{СП}^2},$$

$$\Phi_{СП} = \frac{1}{2} \frac{\delta_{СП} - \sqrt{\delta_{СП}^2 - 39,48\bar{\lambda}_{СП}^2}}{\bar{\lambda}_{СП}^2}, \quad (17)$$

$$\Delta_{СП} = 9,87(1 - \alpha + \beta\lambda_{СП}) + \lambda_{СП}^2. \quad (18)$$

Сравнение задачи механики и нормативных методик

Сравнение расчетных зависимостей по различным решениям представлено в табл. 1. Графики коэффициента устойчивости при центральном сжатии по различным методикам и их сравнение представлены на рис. 2–4.

По решению механической задачи один из членов решения квадратного уравнения (14) содержит в себе относительный эксцентриситет m , в различном виде вошедший в нормы.

Таблица 1

Сравнение расчетных формул [Table 1. Comparison design formulas]

По решению задачи механики [By solving the problem of mechanics]	По EN 1993-1-1:2005 Пункт 6.3.1.2 [11. С. 57] [By EN 1993-1-1:2005 Point 6.3.1.2 [11. С. 57]]	По СП 16.13330.2017 Пункт 7.1.3 [7. С. 11] [By SP 16.13330.2017 Point 7.1.3 [7. С. 11]]
$\varphi = \frac{1}{F + \sqrt{F^2 - \bar{\lambda}^2}}$	$\varphi_{EN} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_{EN}^2}}$	$\varphi_{СП} = \frac{1}{2} \frac{\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48 \bar{\lambda}_{СП}^2}}{\bar{\lambda}_{СП}^2}$
$F = \frac{1}{2}(1 + m + \bar{\lambda}^2)$	$\Phi = \frac{1}{2}(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{EN} - 0,2) + \bar{\lambda}_{EN}^2)$	$\Delta = 9,87(1 - \alpha_{СП} + \beta_{СП} \bar{\lambda}_{СП}) + \bar{\lambda}_{СП}^2$
$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{R_y}{E}}$	$\Phi = \frac{1}{2}(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{EN} - 0,2) + \bar{\lambda}_{EN}^2)$	$\bar{\lambda}_{СП} = \lambda \sqrt{\frac{R_y}{E}}$

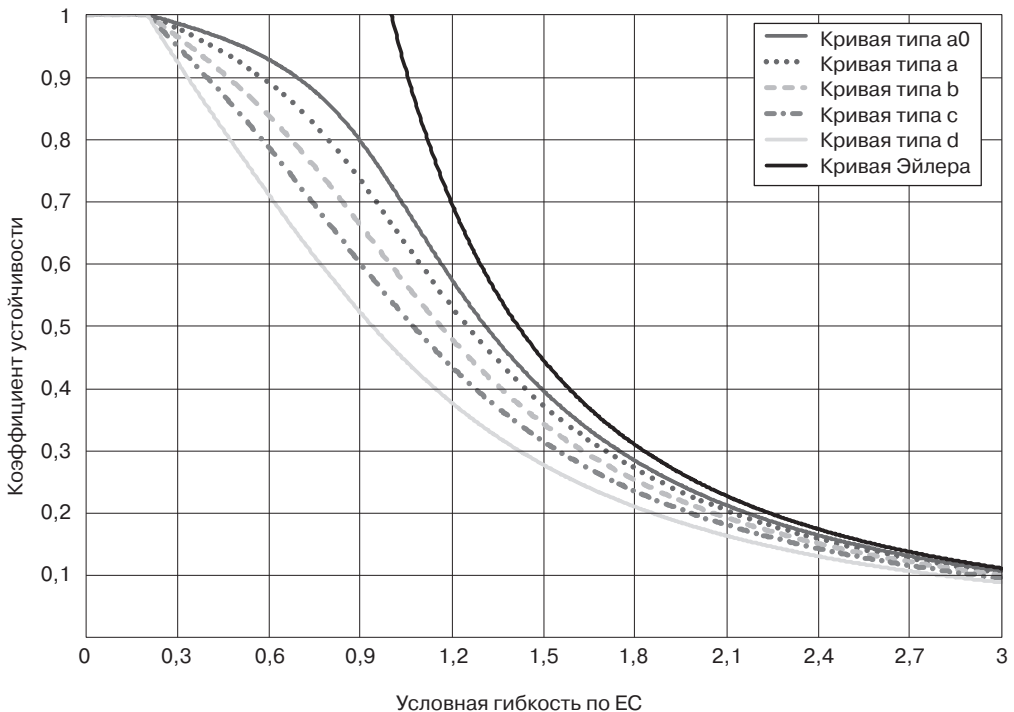


Рис. 2. График коэффициента устойчивости по EN 1993-1-1:2005
[Fig. 2. Buckling coefficient curve according to EN 1993-1-1:2005]

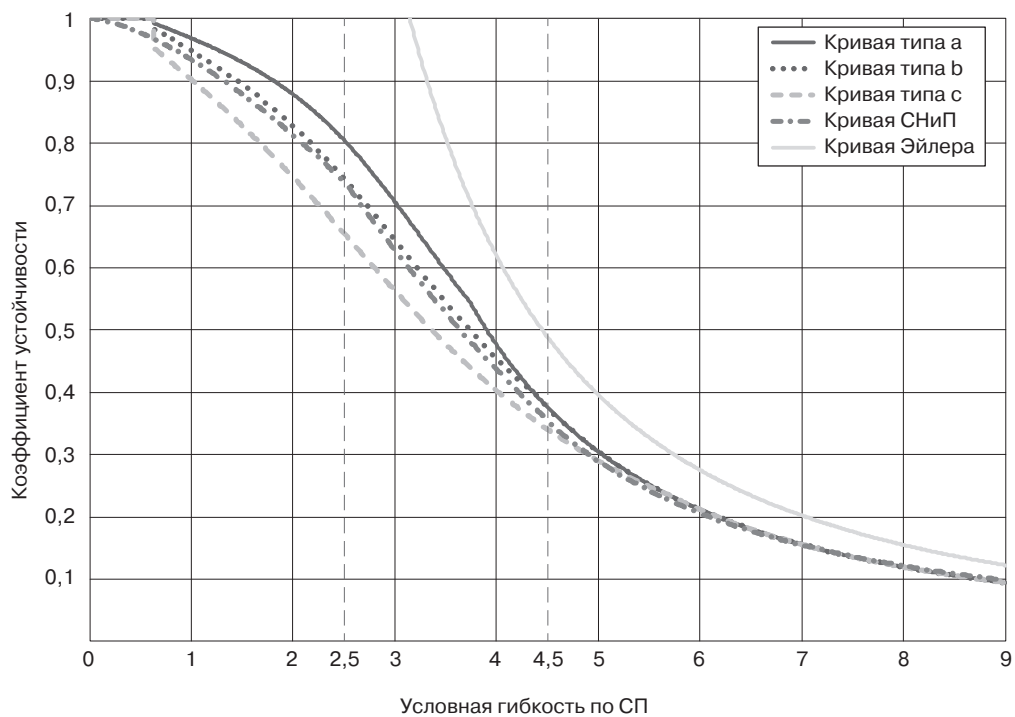


Рис. 3. График коэффициента устойчивости по СП 16.13330.2017
[**Fig. 3.** Buckling coefficient curve according to SP 16.13330.2017]

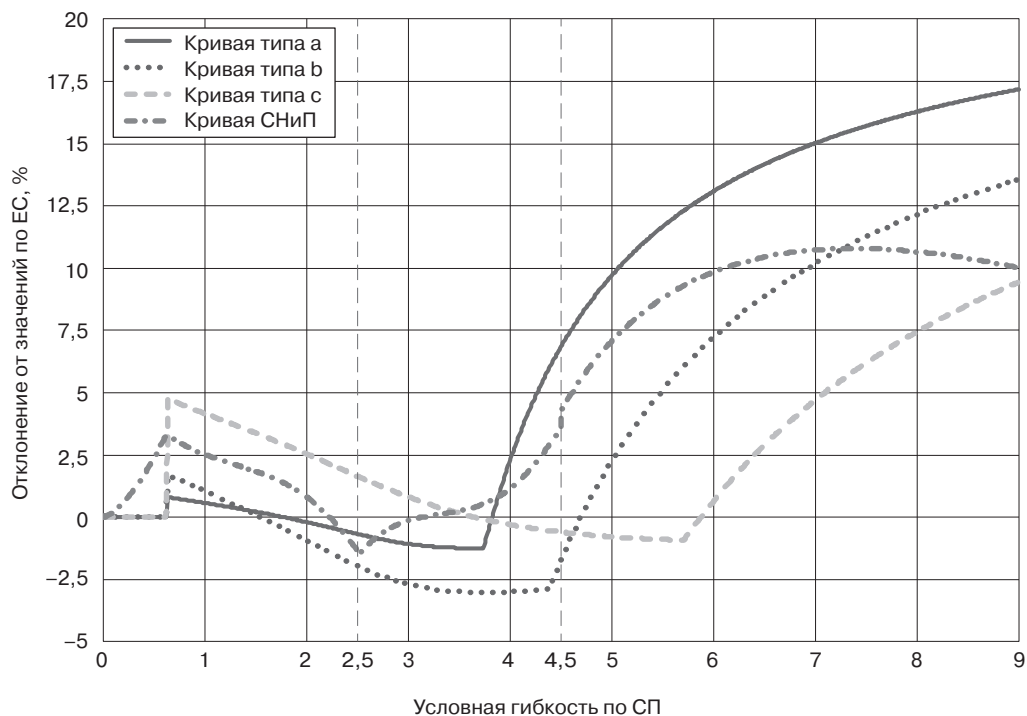


Рис. 4. Сравнение графиков по EN 1993-1-1:2005 и СП 16.13330.2017
[**Fig. 4.** Comparison of EN 1993-1-1:2005 and SP 16.13330.2017 graphs]

Так, в EN [11] для случая центрального сжатия он является относительным случайным эксцентриситетом и зависит от типа и формы сечения и гибкости. Дополнительное вычитание от относительной гибкости значения 0,2 дает смещение графика, учитывающее невозможность потери устойчивости при малых гибкостях. Так, для относительной гибкости меньше 0,2 допускается не учитывать потерю устойчивости.

Аналогичным образом в СП [7] представлен случайный эксцентриситет. Так, для относительной гибкости меньше 0,6 допускается не учитывать явление потери устойчивости, что аналогично взятому из EN [11] значению $0,2\pi = 0,628 \approx 0,6$. Однако есть отличительное требование принимать коэффициент устойчивости не более чем $7,6/\lambda^2$, что является повторением методики, изложенной в пособии к СНиП [10], где для больших гибкостей, для ограничения прогибов сжатых стержней вступало ограничение по кривой Эйлера с запасом в 1,3, и получаем $\pi^2/1,3 = 7,592 \approx 7,6$.

Для построения графика на рис. 4 условная гибкость в уравнениях (15), (16) была разделена на число пи, таким образом приводя эти уравнения к виду аналогичному уравнениям (17), (18).

На рисунках 3 и 4 для кривой СНиП характерны перегибы в ключевых точках с условной гибкостью 2,5 и 4,5, это связано с тем, что для описания кривой коэффициента устойчивости использовались три аппроксимирующие функции [10. С. 17].

Различие значений коэффициентов устойчивости при условной гибкости меньше 4 находится в пределах 5% (рис. 4). При большей условной гибкости различие возрастает за счет того, что для СП вступает ограничение по кривой устойчивости Эйлера для больших гибкостей.

Следует отметить, что нормативные методы расчета по EN и СП, несмотря на различие в определении условной гибкости, имеют единую физическую природу и их отличие состоит лишь в разных подходах в определении случайного эксцентриситета.

Относительный эксцентриситет по EN 1993-1-1:2005

Относительный эксцентриситет m , вошедший в уравнение коэффициента устойчивости (14), по уравнению (16) является линейной функцией от фактора несовершенства α и условной гибкости λ .

Как было отмечено выше, вычитание от условной гибкости значения 0,2 смещает график коэффициента устойчивости, таким образом закрепляя факт невозможности потери устойчивости стержней с малой условной гибкостью.

Фактор несовершенства α в соответствии с п. 6.3.1.2 и табл. 6.1 зависит от начальных несовершенств e_0 / L в соответствии с п. 5.3.2 и табл. 5.1, а также формы сечения и технологии его изготовления по табл. 6.2.

Сопоставляя значения в табл. 5.1 и 6.1, представленные в табл. 2, можно построить график зависимости фактора несовершенства α от начальных несовершенств e_0 / L (рис. 5).

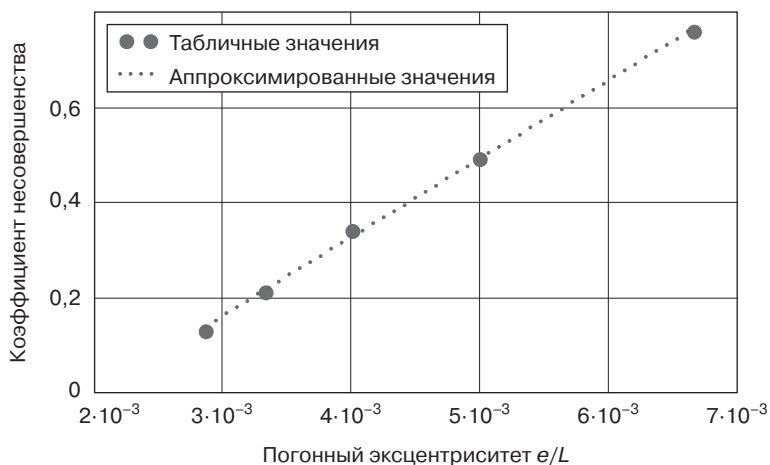


Рис. 5. Зависимость фактора несовершенства от начальных несовершенств
[**Fig. 5.** Relationship of imperfection factor to initial imperfections]

Фактор несовершенства α линейно зависит от начального несовершенства e_0 / L (см. рис. 5) позволяет аппроксимировать его в виде линейной функции:

$$\alpha\left(\frac{e_0}{L}\right) = 165\frac{e_0}{L} - \frac{1}{3}. \quad (19)$$

Уравнение (19) отражает технологический фактор точности изготовления элементов и неизбежно возникающих несовершенств.

Аппроксимированные значения фактора несовершенства и их сравнение, а также сравнение аппроксимированных графиков коэффициента устойчивости представлены в табл. 2.

Таблица 2

Фактор несовершенства по EN 1993-1-1:2005
[**Table 2. Imperfection factor according to EN 1993-1-1: 2005**]

Тип кривой по табл. 5.1 и 6.1 EN [Buckling curve according to table 5.1 и 6.1 EN]	a_0	a	b	c	d
Начальное несовершенство e_0 / L по таблице 5.1 EN [Initial imperfect e_0 / L according to table 5.1 EN]	1/350	1/300	1/250	1/200	1/150
Фактор несовершенства α по таблице 6.1 EN [Imperfection factor α according to table 6.1 EN]	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76
Фактор несовершенства α_{int} аппроксимированный [Imperfection factor α_{int} approximated]	0,138	0,217	0,327	0,492	0,767
Сравнение $\frac{a - \alpha_{int}}{\alpha}$, % [Comparison $\frac{a - \alpha_{int}}{\alpha}$, %]	+6,2	+3,2	-3,9	+0,3	+0,9
Сравнение $\frac{\varphi - \varphi_{int}}{\varphi}$, % [Comparison $\frac{\varphi - \varphi_{int}}{\varphi}$, %]	+1,0	+0,6	0,0	+0,1	+0,3

Если сравнить аппроксимированные и табличные значения фактора несовершенства, то максимальное отличие по диапазону условной гибкости от 0 до 9 составит меньше 6%.

Если сравнить коэффициент устойчивости с использованием аппроксимированных и табличных значений фактора несовершенства, то максимальное отличие по диапазону условной гибкости от 0 до 9 составит меньше 1%.

Таким образом, аппроксимирующая функция фактора несовершенства подобрана с высокой точностью.

Рассматривая совместно уравнения (16) и (19), получаем уравнение относительного эксцентриситета:

$$m_{EC} = \left(165 \frac{e_0}{L} - \frac{1}{3} \right) (\bar{\lambda}_{EC} - 0,2). \quad (20)$$

Относительный эксцентриситет зависит от возможных отклонений прямолинейности, неизбежно возникающих в процессе изготовления, транспортировки и монтажа и прямо пропорционален условной гибкости, т.е. связан с формой сечения и длиной элемента.

Относительный эксцентриситет по СП 16.13330.2017

Относительный эксцентриситет m , вошедший в уравнение коэффициента устойчивости (14), по уравнению (18) является линейной функцией от коэффициентов несовершенства α , β и условной гибкости λ . Коэффициенты α и β зависят только от формы сечения (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты несовершенства по СП 16.13330.2017
[Table 3. Imperfection factors according to SP 16.13330.2017]

Тип кривой по таблице 7 СП [Buckling curve according to table 7 СП]	a	b	c
Коэффициент α по таблице 7 СП [Factor α according to table 7 СП]	0,03	0,04	0,04
Коэффициент β по таблице 7 СП [Factor β according to table 7 СП]	0,06	0,09	0,14

Вид относительного эксцентриситета в уравнении (18) близок по своей сути к случайному эксцентриситету в [10. С. 17], который имеет вид

$$e_0 = \frac{L}{750} + \frac{i}{20}. \quad (21)$$

Это уравнение можно преобразовать к виду

$$m_{СП} = \frac{e_0}{\rho} = \left(\frac{1}{750} \frac{L}{\rho} \right) + \left(\frac{1}{20} \frac{i}{\rho} \right) = \left(\frac{1}{750} \frac{L}{i} k \right) + \left(\frac{1}{20} k \right) = \left(\frac{1}{b} \lambda k \right) + \left(\frac{1}{a} k \right),$$

$$\left(\frac{1}{b} \cdot \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}} \cdot k \right) + \left(\frac{1}{a} \cdot k \right) = \beta_{СП} \cdot \bar{\lambda}_{СП} + \alpha_{СП}. \quad (22)$$

Анализируя выражение (22), можно прийти к выводу, что коэффициент α учитывает распределение материала по плоскости сечения, а коэффициент β учитывает допуски прямолинейности изготовления элементов. При этом для сталей с более высоким пределом текучести коэффициент несовершенства будет выше. Следуя этому предположению, можно вывести такие соотношения L/ρ и i/ρ , которые будут удовлетворять табличным значениям, приведенным в нормативных документах.

Коэффициент несовершенства β будет принимать тем большие значения, чем меньше предел текучести стали. Так, в наиболее неблагоприятном случае имеем сталь С235 с пределом текучести $R_y = 230$ МПа и модулем упругости $E = 206$ ГПа. Для данной стали получаем соотношение $\sqrt{(E/R_y)} \approx 30$. Далее, зная коэффициенты несовершенства α и β различных кривых, для различных значений коэффициента k получаем коэффициенты a и b из соотношения (22) (табл. 4).

Значения радиусов инерции i , радиуса ядра ρ и допустимые несовершенства по длине e/L , полученные из анализа нормативных документов на стальной прокат, приведен в табл. 5.

Сопоставляя информацию табл. 4 и 5, можно отметить, что при коэффициенте $k = i/\rho = 1,2$ коэффициенты a и b принимают целочисленные значения, аналогичные выражению (21). Аппроксимированные значения коэффициентов a и b , заложенные в основе коэффициентов α и β , близки к нормативным значениям, представленным в табл. 6.

Таблица 4

Коэффициенты a и b для различных значений коэффициента k
[Table 4. Coefficients a and b for different values of coefficient k]

Коэффициент k [Factor k]		1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Кривая типа a [Buckling curve a]	Коэффициент b [Factor b]	550,0	600,0	650,0	700,0	750,0	800,0
	Коэффициент a [Factor a]	36,7	40,0	43,3	46,7	50,0	53,3
Кривая типа b [Buckling curve b]	Коэффициент b [Factor b]	366,7	400,0	433,3	466,7	500,0	533,3
	Коэффициент a [Factor a]	27,5	30	32,5	35	37,5	40
Кривая типа c [Buckling curve c]	Коэффициент b [Factor b]	235,7	257,1	278,6	300,	321,4	342,9
	Коэффициент a [Factor a]	27,5	30	32,5	35	37,5	40

Таблица 5

Соотношение i/ρ основных типов стального проката
[Table 5. Ratio i/ρ for the main types of steel profiles]

Поперечное сечение [Cross section]	Минимальное значение i/ρ [Minimum value i/ρ]	Среднее значение i/ρ [Medium value i/ρ]	Максимальное значение i/ρ [Maximum value i/ρ]	Значение e/L [Value e/L]
Труба круглая ГОСТ 10704-91 [Round pipe GOST 10704-91]	1,21	1,44	1,49	1/500—1/1000
Двутавр нормальный ГОСТ 26020-83 [Rolling I-beam GOST 26020-83]	1,20	1,23	1,28	1/500—1/1000
Двутавр широкополочный ГОСТ 26020-83 [Rolling I-beam S-Section GOST 26020-83]	1,16	1,18	1,21	1/500—1/1000
Двутавр колонный ГОСТ 26020-83 [Rolling I-beam W-Section GOST 26020-83]	1,14	1,14	1,15	1/500—1/1000
Уголок главные оси ГОСТ 8509-93 [Angle main axes GOST 8509-93]	1,18	1,30	1,37	1/250—1/500
Уголок нормальные оси ГОСТ 8509-93 [Angle normal axes GOST 8509-93]	1,49	1,64	1,71	1/250—1/500
Швеллер ГОСТ 8240-97 [Channel GOST 8240-97]	1,23	1,25	1,30	1/500—1/750

Таблица 6

Вероятные значения коэффициентов a и b
[Table 6. Probable values of coefficients a and b]

Коэффициент [Factor]	a	b	α^*	β^*	α	β	$\Delta \alpha^*$, %	$\Delta \beta^*$, %
Кривая типа а [Buckling curve a]	40	600	0,030	0,060	0,030	0,060	0	0
Кривая типа b [Buckling curve b]	30	400	0,040	0,090	0,040	0,090	0	0
Кривая типа c [Buckling curve c]	30	250	0,040	0,144	0,040	0,140	0	3

* Значения коэффициентов α и β получены по (22) при $\sqrt{(E/R_y)} = 30$ и $k = i/\rho = 1,2$.

[* The values of the factors α и β are obtained from the (22) if $\sqrt{(E/R_y)} = 30$ and $k = i/\rho = 1,2$.]

Сравнение относительного эксцентриситета по EN и СП

Относительный эксцентриситет m по EN является линейной функцией от условной гибкости и фактора несовершенства a . Фактор несовершенства зависит от формы (двутавр, швеллер, уголок и т.д.) и типа сечения (горячекатаное, холоднодеформированное, сварное). Таким образом, относительный эксцентриситет связан со случайными искривлениями продольной оси элемента и зависит от формы сечения и технологии изготовления элемента.

Относительный эксцентриситет m по СП является линейной функцией от условной гибкости и коэффициентов несовершенств α и β . Коэффициент несовершенства α зависит от формы сечения, а коэффициент несовершенства β зависит от допусков прямолинейности изготовления.

Наличие единого фактора несовершенства по EN отражает технологические аспекты изготовления стальных конструкций и высокий уровень монтажных работ, не требующий введения коэффициента, учитывающего возможные неточности монтажа.

Наличие двух коэффициентов несовершенства по СП связано с возможной кривизной продольной оси элементов, возникающей при изготовлении, транспортировке и складировании, а также с отклонением от проектного положения при монтаже конструкции.

Следует отметить, что начальное несовершенство по EN больше чем по СП, что косвенно компенсирует возможный эксцентриситет приложения силы и подтверждается совпадающими графиками коэффициента устойчивости.

Заключение

Приведено приближенное аналитическое решение механической задачи о сжатии шарнирно закрепленного стержня продольной силой, приложенной с эксцентриситетом.

Из аналитического решения выведены зависимости для нормативных методик по EN и СП, имеющие единый физический смысл, но разные подходы к определению относительного эксцентриситета. Их сравнение дает расхождение коэффициента устойчивости в пределах 5% при условной гибкости $\lambda < 4$; при больших значениях в СП для ограничения прогибов сжатых стержней коэффициент устойчивости ограничивается кривой Эйлера с запасом в 30%.

Относительный эксцентриситет по EN связан с одним фактором несовершенства, который зависит от формы поперечного сечения и начальных отклонений от прямолинейности оси элемента, связанных с технологией изготовления, что отражает высокий уровень выполнения монтажных работ не требующий учета возможного эксцентриситета. Аппроксимированный фактор несовершенства α отличается от табличного до 6%, а коэффициент устойчивости φ по аппроксимированным значениям α отличается от табличного до 1%.

Относительный эксцентриситет по СП связан с двумя коэффициентами несовершенства, которые зависят от формы сечения и отражают возможную начальную кривизну элемента и возможный эксцентриситет приложения силы. Выяснено, что в основу коэффициентов положено соотношение $i/\rho = 1,2$ и приведено пошаговое получение коэффициентов с точностью до 3%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Эйлер Л.* Метод нахождения кривых, обладающих свойствами максимума или минимума, или решение изопериметрической задачи, принимаемой в самом широком смысле. М.: ГТТИ, 1934. 600 с.
- [2] *Ясинский Ф.С.* Избранные работы по устойчивости сжатых стержней. М.: ГИТТЛ, 1952. 430 с.
- [3] *Лейтес С.Д.* Устойчивость стальных сжатых стержней. М.: ГИЛСА, 1954. 567 с.
- [4] *Тимошенко С.П.* Устойчивость упругих систем. М.: ГИТТЛ, 1955. 567 с.
- [5] *Стрелецкий Н.С.* Материалы к курсу стальных конструкций. Вып. II. Ч. 1: Работа сжатых стоек. М.: Госстройиздат, 1959. 284 с.
- [6] *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.

- [7] СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции». М.: Росстандарт, 2017. 146 с.
- [8] СП 16.13330.2011 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции». М.: Росстандарт, 2011. 178 с.
- [9] СНиП II-23-81* Стальные конструкции. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. 96 с.
- [10] Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. 150 с.
- [11] EN 1993-1-1 Eurocode 3 — Design of steel construction — Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: European committee for standardization, 2008. 91 p.
- [12] *Trahair N.S., Bradford M.A., Nethercot D.A., Gardner L.* The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3, Fourth edition. Abingdon: Taylor & Francis, 2008. 491 p.
- [13] *Александров А.В., Потанов В.Д., Державин Б.П.* Сопrotивление материалов: учебник для вузов. 3-е изд. испр. М.: Высшая школа, 2003. 560 с.

© Аникеев И.Д., Голиков А.В., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 15 мая 2018

Дата принятия к печати: 17 июля 2018

Для цитирования:

Аникеев И.Д., Голиков А.В. Вывод и анализ методик расчета центрально сжатых стальных стержней, заложенных в различные нормативные документы // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования.* 2018. Т. 19. № 3. С. 299–316. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-299-316

Сведения об авторах:

Аникеев Илья Дмитриевич — магистрант кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений Института архитектуры и строительства, Волгоградский государственный технический университет. *Область научных интересов:* пространственные стержневые конструкции, перекрестно-стержневые системы. *Контактная информация:* e-mail: anikeevid@yandex.ru

Голиков Александр Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений Института архитектуры и строительства, Волгоградский государственный технический университет. *Область научных интересов:* расчет и проектирование высотных сооружений, оценка состояния эксплуатируемых конструкций. *Контактная информация:* e-mail: alexandr_golikov@mail.ru

Derivation and analysis of methods for calculation of axially loaded steel compression members based on different building codes

I.D. Anikeev, A.V. Golikov

Volgograd State Technical University
1, Akademicheskaya str., Volgograd, 400074, Russian Federation

Abstract. The article presents the physical significance of the study of axially loaded steel compression members and the origin of accepted analytical models, which are the basis for the methods of their calculation in current building codes of CIS and European countries. An approximate solution of the

problem of eccentrically loaded elastic compression member is given and analytical relationships for determining the buckling coefficient as a result of solving an analytical problem and as a result of applying building codes are obtained. Based on the results from solving the structural analysis problem, a solution for axially loaded compression member buckling coefficient, which is the ratio of such stress value from axial compression to the yield stress of steel at which the outermost fibers of the cross section yield, is given. When obtaining the solution of the buckling coefficient for axial compression, it is justified that the clarity of obtaining a solution is achieved by introducing the number Π in place of the numerical values. It is indicated that the reason for shifting relative eccentricity from the ideal value of 0.2 is the impossibility of buckling at small slenderness ratios. It is justified that the calculation methods described in Eurocode and the building code of Russia (SNiP), despite the difference in the definition of nominal slenderness ratio, have common physical significance and their difference is only in approaches to the definition of random eccentricity. The building code approaches to calculating relative eccentricity included in buckling coefficient are stated and analyzed and their physical significance is described. The significance of relative eccentricity which is included in European and Russian codes is unfolded and the relationship between relative eccentricity and imperfections in the shape and type of cross-section is indicated. The significance of the imperfection factor in accordance with EN 1993-1-1: 2005 which depends on initial imperfections, the shape of the cross-section and the technology of member manufacture is explained and the application of approximating linear function, which reflects the technological factor of precision of manufacturing and inevitably arising imperfections, is justified. The significance of the coefficients of imperfection α and β , which are included in the Russian building code for steel structures, is unfolded.

Key words: buckling, steel member, axial compression, building code methods, relative eccentricity

REFERENCES

- [1] Euler L. Metod nakhozhdeniya krivyykh, obladayushchikh svoistvami maksimuma ili minimuma, ili reshenie izoperimetricheskoi zadachi, prinimaemoi v samom shirokom smysle [Method for finding curves with maximum or minimum properties or solving an isoparametric problem in its general sense]. Moscow: GTTI Publ., 1934. 600 p. (In Russ.)
- [2] Yasinskij F.S. Izbrannye raboty po ustoychivosti szhatykh sterzhnei [Selected studies on column buckling]. Moscow: GITTL Publ., 1952. 430 p. (In Russ.)
- [3] Lejtes S.D. Ustoychivost' stal'nykh szhatykh sterzhnei [Buckling of steel columns]. Moscow: GILSA Publ., 1954. 567 p. (In Russ.)
- [4] Timoshenko S.P. Ustoychivost' uprugikh sistem [Buckling of elastic systems]. Moscow: GITTL Publ., 1955. 567 p. (In Russ.)
- [5] Streleckij N.S. Materialy k kursu stal'nykh konstruksii. Vyp. II. Ch. 1: Rabota szhatykh stoek [Materials for steel structures course. Issue II. Part 1: Strength of elastic columns]. Moscow: Gosstroizdat Publ., 1959. 284 p. (In Russ.)
- [6] Volmir A.S. Ustoychivost' deformiruemykh sistem [Buckling of deforming systems]. Moscow: Nauka Publ., 1967. 984 p. (In Russ.)
- [7] SP 16.13330.2017 «SNiP II-23-81* Stalnye konstrukcii» [Steel structures]. Moscow: Rosstandart Publ., 2017. 146 p. (In Russ.)
- [8] SP 16.13330.2011 «SNiP II-23-81* Stalnye konstrukcii» [Steel structures]. Moscow: Rosstandart Publ., 2011. 178 p. (In Russ.)
- [9] SNiP II-23-81* Stalnye konstrukcii [Steel structures]. Moscow: CITP Gosstroya USSR, 1990, 96 p. (In Russ.)
- [10] Posobie po proektirovaniyu stalnykh konstrukcij k SNiP II-23-81* [Steel structures design manual for SNiP II-23-81*]. Moscow: CITP Gosstroya USSR, 1989. 150 p. (In Russ.)
- [11] EN 1993-1-1 Eurocode 3 — Design of steel construction — Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: European committee for standardization, 2008. 91 p.
- [12] Trahair N.S., Bradford M.A., Nethercot D.A., Gardner L. The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3, Fourth edition. Abingdon: Taylor & Francis, 2008. 491 p.

- [13] Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivlenie materialov: uchebnik dlya vuzov. 3-e izd. ispr.* [Strength of materials: University textbook. 3rd edition. Corrected]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2003. 560 p. (In Russ.)

Article history:

Received: May 15, 2018

Accepted: July 17, 2018

For citation:

Anikeev I.D., Golikov A.V. (2018). Derivation and analysis of methods for calculation of axially loaded steel compression members based on different building codes. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(3), 299—316. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-299-316

Bio Note:

Ilya D. Anikeev — Master student at the Department of Structures, Foundations and Safety of Buildings, Institute of Architecture and Construction, Volgograd State Technical University. *Research interests:* spaceframe structures, in particular, grid systems. *Contact information:* e-mail: anikeevd@yandex.ru

Alexander V. Golikov — Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Structures, Foundations and Safety of Buildings, Institute of Architecture and Construction, Volgograd State Technical University. *Research interests:* analysis and design of high-rise structures, structural assessment. *Contact information:* e-mail: alexandr_golikov@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-317-324

УДК 626/627

Гидрологическая безопасность и анализ риска аварий гидроузлов

М.А. Стрыгина¹, И.И. Грицук^{2, 1, 3}

¹ Институт водных проблем РАН

Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Губкина, 3

² Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

³ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64

Гидротехнические сооружения (ГТС) — инженерные сооружения, предназначенные для использования водных ресурсов и предотвращения негативного воздействия вод и загрязняющих веществ, эксплуатирующиеся десятки или сотни лет и являющиеся в целом надежными сооружениями. Под гидрологической безопасностью понимают устойчивость гидротехнического сооружения при его эксплуатации к экстремальным гидрологическим воздействиям природного и техногенного характера. Большинство гидротехнических сооружений построено по современным проектам в соответствии с действующими нормативными документами, однако вероятность аварий на гидросооружениях имеет тенденцию к росту, особенно после 30-летней эксплуатации. Наиболее тяжелые по последствиям чрезвычайные ситуации возникают при пропуске гидротехническими сооружениями (например, плотинами крупными водохранилищ) сверхрасчетных расходов, особенно если такой пропуск сопряжен с неумелыми действиями службы эксплуатации. Об этом свидетельствуют материалы Международной комиссии по большим плотинам, в соответствии с которыми ежегодно в мире на гидроузлах происходит около 3000 аварий разной степени. Большинство аварий, связанных с прорывом напорного фронта, можно было бы избежать при условии постоянного контроля технического состояния сооружения и наличия необходимой квалификации эксплуатирующего персонала.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, гидрологическая безопасность, анализ риска аварий, волна прорыва

Введение

Анализ причин аварий показывает, что собственники гидротехнических сооружений (ГТС) и эксплуатирующие организации не соблюдают законодательство Российской Федерации в области безопасности ГТС:

- не принимаются необходимые меры для обеспечения безопасной эксплуатации ГТС, в том числе по установлению их критериев безопасности;
- не обеспечивается контроль (мониторинг) за показателями состояния ГТС при возрастающих природных и техногенных воздействиях;
- не проводятся регулярные обследования состояния ГТС установленных на ГТС контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) и оборудования;

— не обеспечивается наличие в достаточном объеме необходимого количества резервов строительных материалов, средств, специальной техники для оперативной локализации повреждений и аварийных ситуаций на ГТС.

Важным фактором является также неправильный выбор расчетной модели, определяющей пропускную способность водосбросных сооружений. При эксплуатации гидротехнических сооружений необходимо сопоставлять их фактическое состояние и проектное, особое внимание уделяя характеристикам режима рек, особенно максимальному расходу. При показателях, существенно отличающихся от проектных, необходимо провести исследования с целью установления причин их появления, возможного влияния на сооружение и их предотвращения. Многих аварий удалось бы избежать при постоянных и качественно проведенных обследованиях. Прогнозирование и предотвращение возможных ЧС, а также локализация и ликвидация аварийных ситуаций является основой безопасной эксплуатации ГТС [1].

Правительство Российской Федерации разрабатывает и реализует государственную политику в области безопасной эксплуатации ГТС, это регламентируется Федеральным законом от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений», в котором определены требования к обеспечению безопасной эксплуатации сооружений, полномочия Правительства Российской Федерации и органов исполнительной власти субъектов федерации, права и обязанности собственников сооружений и эксплуатирующих организаций.

Основным документом, содержащим сведения о гидротехническом сооружении, соответствии его технического состояния критериям безопасности, является декларация безопасности [2].

При составлении деклараций особое внимание уделяется выявлению опасностей и определению сценариев возможных аварий, количественной оценке риска их возникновения и планированию мер по предупреждению и ликвидации аварийных ситуаций, а также по обеспечению технически исправного состояния ГТС.

Методика оценки гидрологической безопасности

Оценка состояния гидротехнических сооружений проводится путем сопоставления фактических значений диагностических показателей с их критериальными значениями, что позволяет своевременно определить ухудшение технического состояния сооружения и предпринять меры к предотвращению аварий.

Причинами аварий, сопровождающихся прорывом напорного фронта гидротехнических сооружений и затоплением территорий, чаще всего бывают:

- суффозия в основании или теле плотины;
- недостаточная пропускная способность водосбросов;
- воздействие сверхрасчетных нагрузок природного характера;
- конструктивные дефекты;
- нарушение правил эксплуатации.

В трети случаев причиной аварии становится превышение сбросного расхода пропускной способности сооружения с переливом воды через гребень плотины [3].

Аварии на ГТС могут сопровождаться:

- выходом ГТС или объектов второстепенного назначения из строя, прекращением их функционирования;
- невозможностью дальнейшего использования различных объектов по назначению по причинам, связанным с неисправностью, разрушением либо повреждением гидросооружения;
- аварийным опорожнением водохранилища;
- возникновением условий для развития гидродинамической аварии (ГДА);
- возникновением условий для развития негативной экологической ситуации.

При авариях на ГТС основной ущерб наносится вследствие воздействия волны прорыва (ВП), образовавшейся в результате прорыва напорного фронта и резкого падения большого объема воды из верхнего бьефа.

Наибольшую опасность представляют разрушения плотин или дамб крупных водохранилищ, расположенных в черте населенных пунктов, при которых происходит быстрое затопление близлежащих территорий со значительными материальными и людскими потерями.

Поэтому важнейшее значение приобретают профилактические меры по предотвращению катастрофических событий. Как показывает практика, в подавляющем большинстве аварий, связанных с прорывом напорного фронта и обвально-оползновыми явлениями на водохранилищах, жертв можно было бы избежать при условии своевременного оповещения населения. При постоянных визуальных наблюдениях за гидротехническими сооружениями можно заметить первые признаки надвигающейся катастрофы, предусмотреть сценарии развития аварийной ситуации. Тем не менее соответствующие эксплуатационные службы и органы власти, как правило, бездействуют, в результате чего число жертв иногда достигает тысячи и более человек.

Одной из причин такого положения является проектная установка на «недопустимость», а значит, и «невозможность» аварий на современных ГТС. Принцип абсолютной безопасности или нулевого риска является доминирующим в гидротехнических нормах. Он сводится к тому, что если действовать в соответствии с установленными нормами проектирования и правилами эксплуатации, то можно гарантировать безопасность объекта. Поэтому во многих случаях обслуживающий персонал оказывается не готов к аварии, в том числе и психологически. В то же время опыт эксплуатации ГТС показывает, что полностью исключить аварии и нарушения на ГТС, в том числе и с катастрофическими последствиями, невозможно. Необходимо полностью менять подход к проблеме обеспечения безопасности таких сложных объектов, как ГТС, переходя к принципу управления рисками.

Допущение возможности ГДА может иметь большое значение для разработки особых мер по безопасности ГТС как с точки зрения минимизации вероятности ее возникновения, так и локализации и минимизации ее последствий.

Почти ежегодно на водосбросах гидроузлов осуществляются холостые сбросы. Зачастую они происходят, даже когда нет необходимости в дополнительном пропуске воды.

Последовательная схема регулирования водохранилища характеризуется заполнением полезного объема во время паводка с последующим пропуском остального объема воды через водосбросное сооружение без превышения максимально-го расхода, на который рассчитан нижний бьеф.

При параллельной схеме холостой сброс воды начинается заблаговременно, до заполнения полезного объема водохранилища. Особенно актуальна такая схема в случае прогнозируемого притока, превышающего расчетные показатели (например, разрушение вышележащего водохранилища). Заблаговременное начало холостого сброса является одним из основных факторов для обеспечения гидрологической безопасности гидроузла, которая невозможна, если не предусмотрены аккумуляция и сброс воды.

Основным последствием ГДА является катастрофическое затопление местности, характеризующееся следующими параметрами:

- максимальными высотой и скоростью волны прорыва;
- максимальной глубиной затопления участка местности.

Наводнения всегда были естественным сдерживающим фактором хозяйственного освоения пойменных территорий. Однако под воздействием социальных и экономических причин общество «разучилось» адекватно оценивать риски возникновения аварии. В нижнем бьефе гидротехнического сооружения и на территориях, попадающих в зону возможного затопления, не должно быть важных, недостаточно защищенных хозяйственных объектов и жилых построек, а также объектов, стесняющих поток воды.

В условиях повышения в России риска возникновения аварий и катастроф на крупных, экологически опасных сооружениях, снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайной ситуации становится одной из важнейших проблем.

До недавнего времени основное внимание уделялось ликвидации последствий ЧС, т.е. оперативному реагированию на аварии, что не только не уменьшает затраты на возмещение ущерба, но и не способствует снижению риска возникновения чрезвычайной ситуации [2].

Реализация научно обоснованной системы превентивных мер по предупреждению стихийных бедствий и техногенных катастроф является наиболее экономически и социально оправданной.

Анализ риска аварий ГТС

При обосновании безопасности тех или иных производств используются различные направления, подходы и методы анализа риска. Несмотря на значительное разнообразие, их объединяет одна цель — выработка и принятие надежных и безопасных решений в условиях неопределенности и риска.

В общем случае процедура количественной оценки риска включает два этапа [4]:

- 1) оценка вероятностей реализации опасных событий с учетом меры негативных последствий для населения и окружающей среды;
- 2) оценка риска по последствиям возможных ущербов.

Первый этап анализа риска предусматривает:

— определение опасностей, установление источников опасностей, объектов их потенциального влияния, основных форм такого влияния и мер воздействия; по социальному фактору — установление уязвимых социальных групп (групп риска);

— определение факторов риска (техничко-экономических, экологических, социальных); установление стандартов по обеспечению безопасности персонала, социальных групп, экосистем и отдельных биологических видов, экономических и материальных ценностей;

— оценку вероятностей нарушения качественных и количественных критериев социальной, экологической и экономической безопасности применительно к каждому источнику и фактору риска.

Второй этап включает:

— анализ подверженности — вероятности влияния опасностей на окружающую среду и человека и анализ масштабов угроз по каждому фактору риска; определение вероятных удельных потерь и ущербов по факторам риска;

— оценку вероятных потерь и ущербов по учитываемым факторам риска;

— оценку компонент риска по учитываемым факторам и их обобщение (интегрирование, суммирование).

Основной целью оценки риска является управление им — разработка и обоснование решений, в том числе и в форме отраслевых и нормативных актов, направленных на уменьшение угроз, минимизацию и оптимизацию рисков. При этом выделяют:

— установление приоритетов среди источников и факторов риска, требующих первоочередного внимания со стороны субъектов управления;

— определение путей минимизации обобщенного риска при заданных ограничениях на ресурсы и время;

— оптимизацию решений, направленных на ограничение риска;

— управление остаточным риском, которое включает в себя следующие элементы: оценка приемлемого риска, информирование общественности, передача (перевод, перемещение) риска, контроль и финансирование риска.

Федеральным законом РФ от 27 июля 2010 г. № 225-ФЗ «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте» вводится обязательное страхование ответственности владельца ГТС за убытки, понесенные частными лицами и организациями в случае аварий. Страхование может выполнять и превентивную функцию, так как страховые компании законодательно имеют право часть страховых платежей направлять на разработку и внедрение предупредительных мероприятий по снижению риска, причем это реализуется как в интересах страхователя, так и страховщика. При страховании конкретных ГТС страховщик может произвести коррекцию тарифа как в сторону его увеличения, так и в сторону уменьшения в зависимости от технического состояния ГТС и класса опасности, что устанавливается на основе декларации безопасности.

Все эти мероприятия направлены на то, чтобы свести к минимуму допускаемые в проекте риски и сократить общую сумму издержек, которые они могут за собой

повлечь. Управление риском наиболее полезно на ранних стадиях проекта, еще до его реализации во время предварительного изучения, когда возможна определенная гибкость в принятии решений. В этом случае многие риски можно свести к минимуму или целиком избежать их.

Достоверность оценок риска со временем может показаться недостаточной, поэтому все используемые расчетные процедуры нуждаются в систематической корректировке как с точки зрения новых достижений науки и техники, накопленной информации об объекте, так и с учетом восприятия риска общественностью.

Заключение

Гидротехнические сооружения, расположенные, как правило, в черте населенных пунктов, при разрушении могут привести к катастрофическому затоплению обширных территорий, огромным экономическим и социальным потерям, степень которых будет зависеть от надежности ГТС, а также от параметров волны прорыва.

Важное значение для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на ГТС имеет тесное взаимодействие собственника сооружения или эксплуатирующей организацией с органами исполнительной власти, в частности информирование последних об опасном состоянии гидроузла и угрозе возникновения ЧС, поддержание локальных систем оповещения в рабочем состоянии, разработка противоаварийных мероприятий, проведение учений персонала по действиям в чрезвычайных ситуациях и т.д.

Эффективная оценка состояния ГТС возможна только при проведении постоянных визуальных и инструментальных наблюдений, обеспечивающих получение достоверной информации о фактическом состоянии сооружения, необходимой для сопоставления с критериями безопасности и выявления возможных уязвимостей.

В связи с тем, что многие аварии связаны с человеческим фактором, необходимо проводить обучение сотрудников и осуществлять контроль за соблюдением ими своих должностных обязанностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Ляпичев Ю.П.* Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений: учеб. пособие. М.: Изд-во РУДН, 2008. 222 с.
- [2] *Малик Л.К.* Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности. М.: Наука, 2005. 354 с.
- [3] *Ляпичев Ю.П., Пономарев Н.К.* Гидротехнические сооружения: учеб. пособие. М.: Изд-во РУДН, 2008. 456 с.
- [4] *Векслер А.Б., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д.В.* Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. Санкт-Петербург: ОАО «ВНИИГ им Б.Е. Веденеева», 2002. 592 с.

© Стрыгина М.А., Грицук И.И., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 01 апреля 2018

Дата принятия к печати: 10 июля 2018

Для цитирования:

Стрыгина М.А., Грицук И.И. Гидрологическая безопасность и анализ риска аварий гидротехнических сооружений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 317–324. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-317-324

Сведения об авторах:

Стрыгина Мария Александровна — аспирант лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики, Институт водных проблем Российской академии наук. *Область научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, гидротехническое строительство. *Контактная информация:* e-mail: maria.strygina@gmail.com

Грицук Илья Игоревич — кандидат технических наук, доцент департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. Старший научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики, Институт водных проблем РАН. Доцент кафедры гидравлики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет. *Область научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология, гидротехническое строительство. *Контактная информация:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

Hydrological safety and risk assessment of hydraulic structures

M.A. Strygina¹, I.I. Gritsuk^{2, 3}

¹ Institute of Water Problems Russian Academy of Sciences (IWP RAS)
3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russian Federation

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

³ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)
64, Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

Abstract. Hydraulic structures (HS) are engineering structures of major hazard, intended for use of water resources and prevention of negative impact of water and pollutants, operating tens or hundreds of years and have proven to be generally stable structures. Hydrological safety is understood as stability of hydraulic structures during its operation against extreme hydrological impacts of natural and man-induced nature. Most of the HS are built based on modern projects in accordance with current regulatory documents, but the probability of accidents in hydroelectric facilities tends to grow, especially after 30–40 years of operation. Most severe emergency situations (ES) occur when hydraulic structures, such as dams of large reservoirs, let over-estimated discharge through, especially if it is associated with inept exploitation. This is evidenced by the materials of the International Commission on Large Dams, according to which about 3000 accidents of different degrees occur in hydropower stations worldwide every year.

Most of the accidents associated with breaking waterfront of dam could be avoided by monitoring the technical condition of HS and ensuring necessary training of operating personnel.

Key words: hydraulic structures, hydrological safety, risk assessment, dam-breaking wave

REFERENCES

- [1] Lyapichev Yu.P. *Gidrologicheskaya i tekhnicheskaya bezopasnost' gidrosooruzhenii: uchebnoe posobie* [Hydrological and technical safety of hydraulic structures: a textbook]. Moscow: PFUR Publ., 2008. 222 p. (in Russ.)
- [2] Malik L.K. *Faktory riska povrezhdeniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Problemy bezopasnosti* [Risk factors of damage in hydraulic structures. Security issues]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 354 p. (in Russ.)
- [3] Lyapichev Yu.P., Ponomarev N.K. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya: uchebnoe posobie* [Hydraulic structures: a textbook]. Moscow: PFUR Publ., 2008. 456 p. (in Russ.)
- [4] Veksler A.B., Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V. *Nadezhnost', sotsial'naya i ekologicheskaya bezopasnost' gidrotekhnicheskikh ob"ektov: otsenka riska i prinyatie reshenii* [Reliability, social and ecological safety of hydraulic facilities: risk assessment and decision-making]. Sankt-Peterburg: OJSC «VNIIG im B.Ye. Vedeneeva». 2002. 592 p. (in Russ.)

Article history:

Received: April 01, 2018

Accepted: July 10, 2018

For citation:

Strygina M.A., Gritsuk I.I. (2018). Hydrological safety and risk assessment of hydraulic structures. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(3), 317–324. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-317-324

Bio Note:

Maria A. Strygina — Postgraduate student of the laboratory «Channel flow dynamics and ice thermal conditions», Institute of Water Problems Russian Academy of Sciences (IWP RAS). *Research interests:* hydraulics, engineering hydrology, hydrotechnical construction. *Contact information:* e-mail: maria.strygina@gmail.com

Ilya I. Gritsuk — Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Construction, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). Senior researcher of the laboratory “Channel flow dynamics and ice thermal conditions”, Institute of Water Problems Russian Academy of Sciences (IWP RAS). Associate professor of the Department of Hydraulics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI). *Research interests:* hydraulics, engineering hydrology, hydrotechnical construction. *Contact information:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-325-342

УДК 553.492.1

Петрографическая характеристика бокситов месторождений рудного поля Кулоре (Koulore)

Л. Туре¹, А.А. Чаусов², А.Е. Котельников¹

¹ Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

² ООО «Геопроспект»

В.Р. 6789, г. Конакри, коммуна Ратома, квартал Капоро, Гвинейская Республика

В результате изучения геологического строения месторождений рудного поля Кулоре (Koulore) были установлены основные элементы разреза: коренной субстрат, переходный горизонт и латеритный покров. Латеритный покров сложен нижней частью, представленной полиминеральными и каолиновыми глинами, и верхней — бокситовый горизонт — собственно латеритный покров, сложенный в основном гидроксидами и оксидами железа и алюминия. Бокситовый горизонт имеет зональное строение: в нижней части бокситового горизонта — зона светлых бокситов и в верхней части бокситового горизонта — зона красноцветных бокситов. В результате микроскопического изучения различных образцов пород коры выветривания было выделено несколько разновидностей пород, характеризующихся близкими структурно-текстурными признаками. Была определена группировка по классам: бокситы гелефицированные структурные по алевро-аргиллитам, гелефицированные бокситы по долеритам, бокситы гелеморфные с микролитами по алевро-аргиллитам, латерит-бокситы (низкокачественные бокситы) по алевро-аргиллитам, латерит-бокситы (низкокачественные бокситы) по долеритам, железистые латериты — кираса по алевро-аргиллитам, железистые латериты верхней части переходного горизонта по алевро-аргиллитам. Тип и состав глиноземистых минералов контролируется литолого-генетическими типами бокситов. Классические латеритные бокситы по минеральному составу сложены преимущественно гиббситом, гетитом-алюмогетитом и гематитом, содержание бемита в них не более 1%. Гелеморфные и гелефицированные бокситы сложены гиббситом, бемитом, гетитом-алюмогетитом, гематитом, содержание бемита в этих бокситах выше, чем в классических латеритных, и достигает 3%. Состав алюмогетита зависит не только от литологии бокситов, но и от положения в разрезе коры выветривания.

Ключевые слова: кора выветривания, боксит, латерит, петрография

Геологическое строение района

Рудное поле Кулоре (Koulore) располагается в западной части Гвинейской синеклизы и приурочено к ядру крупной синклиальной структуры Бове [1; 2], вытянутой в север-северо-западном направлении (рис. 1). Она сложена платформенными осадочными образованиями силура и девона, в которые интродуцированы силлы и дайки магматических пород основного состава мезозойского возраста. Широко распространены более молодые континентальные образования: делювиальные, делювиально-пролювиальные, аллювий высоких террас и отло-

жения современных долин. Практически все эти древние и молодые породы (за исключением отложений современных долин) подверглись на дневной поверхности латеритному выветриванию с образованием сплошного чехла латеритной коры выветривания. Латеритные покровы отсутствуют только на крутых участках склонов и в днищах современных долин. В благоприятных условиях в результате латеритного выветривания образовались залежи бокситов.

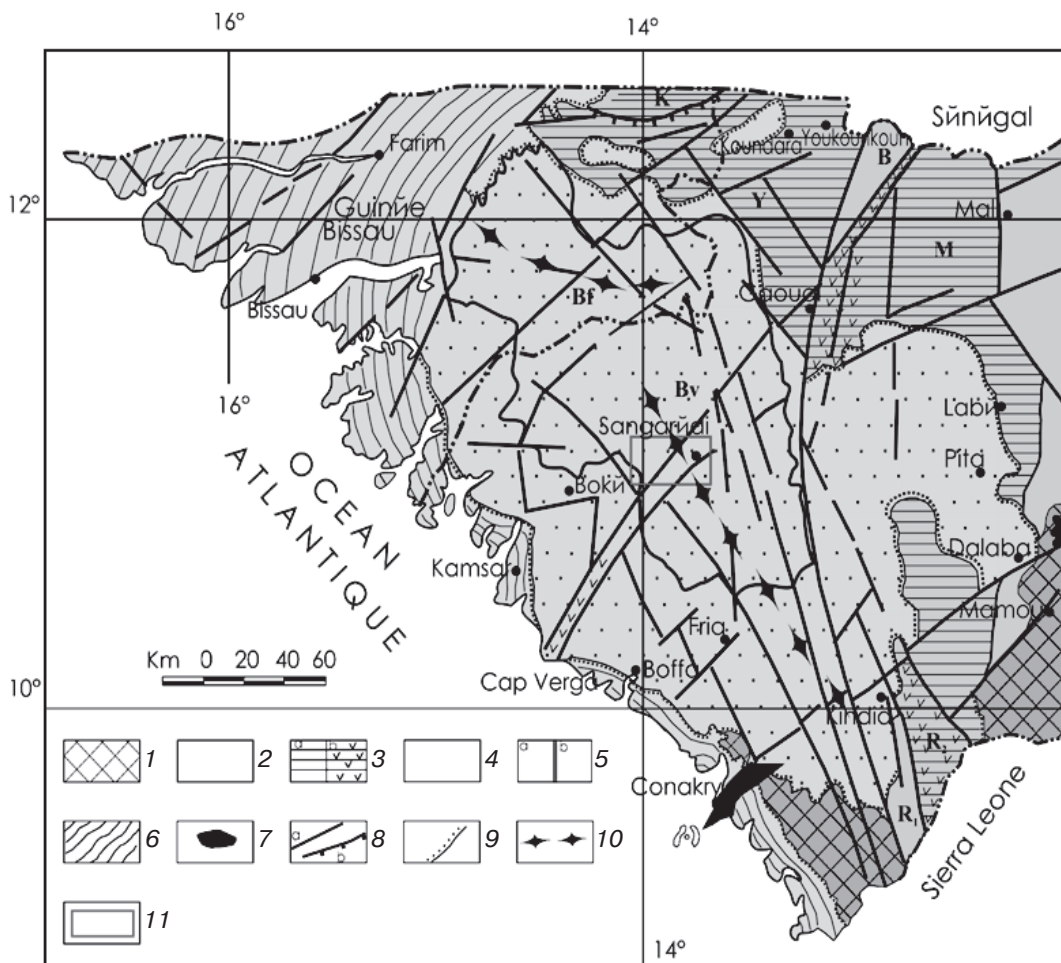


Рис. 1. Геологическое строение района и границы рудного поля (выноска слева сверху) [1]:
1 — архейский и раннепротерозойский фундамент платформы; 2–3 — позднепротерозойская Мавритано-Сенегальская складчатая система: 2 — антиклинорные зоны, выступы (К — Кулунту; В — Бассари; R₁ — Рокел) сложенные терригенными и вулканогенными породами; 3 — прогибы (У — Юкункун; М — Мали-Фалеме; R₂ — Рокел): а) терригенные и карбонатные породы; в) вулканогенные породы; 4–5 платформенный чехол Гвинейской синеклизы: 4 — нижний ярус — позднепротерозойский; 5 — верхний ярус — палеозойский: а) песчаники ордовика и граптолитовые сланцы силура; в) алевриты, аргиллиты и песчаники девона в ядре синклиналей: Vv — Бове; Vf — Бафата; 6 — Мавритано-Сенегало-Гвинейская мезозойско-кайнозойская периокеаническая впадина; 7 — мезозойские ультраосновные породы; 8 — тектонические нарушения: а) разломы; в) надвиг Кулунту; 9 — контакты с угловым несогласием; 10 — оси синклиналей Бове и Бафата; 11 — исследуемая территория (рудное поле)

[Fig. 1. Geological structure of the area and the ore field borders (note on the top left)]



Рис. 2. Типичный разрез коры выветривания месторождений рудного поля Кулоре
[Fig. 2. Typical residuum section of deposits in the Koulore ore field]

Анализ геологического строения месторождений рудного поля Кулоре [2; 4—6] показал, что они характеризуются следующими основными элементами разреза (рис. 2):

— коренной субстрат в пределах рудного поля Кулоре представлен толщей чередования алевро-аргиллитов девона и интродуцированных в них силлов долеритов небольшой мощности (до 2—15 м), за счет чего осложняется внутреннее строение латеритного покрова;

— переходный горизонт имеет зональное строение:

нижняя часть сложена высокожелезистыми породами с реликтовыми прослоями, линзами и пятнами глин, за счет чего здесь повышено содержание кремнезема,

верхняя часть представлена железистыми латеритами с глиноземистыми прожилками и линзами, за счет чего породы участками приобретают состав низкокачественных бокситов;

— латеритные коры имеют классическое строение, в их вертикальном разрезе наблюдается два генерализованных литологических горизонта:

нижний горизонт — полиминеральные и каолинитовые глины,

верхний горизонт — собственно латеритный покров, сложенный в основном гидроксидами и оксидами железа и алюминия. Бокситы обычно слагают среднюю или среднюю-верхнюю часть разреза и нередко по латерали сменяются железистыми латеритами ($Al_2O_3 < 38\%$).

Бокситовый горизонт залегает выше по разрезу коры выветривания. Он также имеет зональное строение, близкое к классическому, несмотря на широкое развитие гелефицированных бокситов:

— в нижней части бокситового горизонта — зона светлых бокситов — породы обладают светлой окраской, относительно высокоглиноземистым составом и характеризуются замещением глиноземистым веществом железистого, за счет чего в порах и кавернах стенки выстланы светлым гелеморфным аморфовидным глиноземным веществом и/или мелко-, микрокристаллическим гиббситом;

— в верхней части бокситового горизонта — зона красноцветных бокситов — породы красноцветные за счет увеличения содержания железа, здесь глиноземистое вещество замещается и пропитывается железистым, за счет чего стенки пор и каверн выполнены колломорфными существенно железистыми образованиями гетитового состава.

Было проведено микроскопическое изучение различных образцов пород коры выветривания, в результате было выделено несколько разновидностей пород, характеризующихся близкими структурно-текстурными признаками, вещественным составом и взаимоотношениями между минералами [3; 5]. На основе генетической классификации бокситов Гвинеи [2; 6] исследуемые породы можно отнести к следующим литолого-генетическим типам бокситов (таблица).

**Литолого-генетические типы бокситов рудного поля Кулоре
[Litho-genetic types of bauxites of the orefield Koulore]**

Класс [Grade]	Литолого-генетические типы [Litho-genetic types]
Латеритный (in situ) [Laterite (in situ)]	Псевдоморфные бокситы по аргиллитам и алевролитам тонкослоистым [Pseudomorphic bauxites on silt-rich mudstone]
	Псевдоморфные бокситы по долеритам, габбро-долеритам и конга-диабазам, массивным, мелко-среднекристаллическим [Pseudomorphic bauxites on massive and small-medium-grained dolerites, gabbro dolerites and konga-diabases]
Преобразованные химическим перераспределением вещества [The substances transformed by chemical redistribution]	Гелефицированные бокситы [Gelified bauxites]
	Оолитовые бокситы [Oolitic bauxites]
	Гелеморфные афанитовые [Gel-morphous adelogenic]

1. Бокситы гелефицированные структурные по алевро-аргиллитам

Псевдобрекчиевая (или хемобрекчия) текстура с участками кавернозной текстуры (рис. 3), поскольку брекчирование связано с хемогенными процессами замещения и перераспределения вещества вдоль трещин и микротрещин, а не с осадочными процессами. Фрагменты имеют в одном никеле бесцветный или палево-желтый цвет, тогда как цементирующая масса имеет очень насыщенный темно-бурый, красный до черного (непрозрачный) цвет. Размер фрагментов составляет от 1—2 до 10 мм. Фрагменты имеют кристаллически-зернистую структуру с размером зерен от пелитовой до алевритовой размерности, местами сохраняется реликтовая обломочная алевритовая структура, унаследованная от исходных алевролитов. Текстура пород в обломках полосчатая, реже массивная. По размерности зерен в обломках можно судить о типе замещенных исходных коренных пород. Фрагменты сложены в основном микро-, тонкокристаллическим гиббситом, представленным изометричными выделениями. Даже участки пелитовой размерности оптически неизотропны. Среди гиббситовой основной массы рассеяны тончайшие зерна гетита, составляющего 10—25% объема фрагментов. Этот гетит придает породе палево-желтый цвет в одном никеле. Гематит слагает удлиненные зерна, образующие равномерную, реже неравномерную вкрапленность в породе. Содержание гематитовых зерен составляет первые проценты. Также характерна мелкая рассеянная вкрапленность анатаза и рутила. Отмечаются единичные зерна кварца алевритовой размерности. Характерно, что в микро-, тонкокристаллической гиббситовой массе появляются сгустки, колломорфные выделения афанитовой полупрозрачной белой массы, имеющей показатель преломления выше, чем у гиббсита. Она сложена большей частью микрокристаллическим бемитом и алюмогелем близкого к бемиту состава. Размер сгусткоподобных гелеморфных выделений обычно не превышает нескольких миллиметров. Доля алюмогеля повышается при усилении степени гелефикации бокситов, в частности, в шлифе 2GPD0055/3.5-4.0 (рис. 3) его содержание выше, чем в шли-

фе 2GPD0055/4.0-5.0 (рис. 3). Местами во фрагментах, подчеркивая их полосчатое строение, по субпараллельным зонам развиты колломорфные афанитовые выделения, представленные ферри- и гематогелем. Ферри- и гематогель явно развиваются по гетит-гипбситовому субстрату фрагментов, замещая его. Цементирующая фрагменты масса имеет массивную кавернозную, пористую текстуру и афанитовую колломорфную структуру. Размер пор до 1—2 мм. Их количество составляет ~20—30%. Цементирующая масса разделяется на два типа. Первый тип представлен гелеморфной белой полупрозрачной массой афанитового и колломорфного сложения. Второй тип сложен колломорфной железистой кавернозной массой. Гелеморфная белая масса имеет массивную афанитовую текстуру и пелитоморфную до афанитовой колломорфной структуру. Сложена она алюмогелем, полупрозрачная и имеет белый, реже желтоватый цвет. Сложена бемитом или алюмогелем близкого состава и характеризуется более высоким по сравнению с гипбситом показателем преломления. Алюмогель не только заполняет пространство между фрагментами, но и активно их разъедает и замещает тонкими жилками и лапчатыми выделениями. Местами алюмогель подвергается раскристаллизации и тогда имеет микро-, тонкозернистое строение, эти участки сложены гипбситом. Такие раскристаллизованные участки могут составлять от 0 до 100% от объема алюмогеля. В зависимости от количества цементирующей массы, сложенной алюмогелем, и степени разъедания этой массой фрагментов наблюдается переход от гелефицированных к гелеморфным бокситам. Колломорфная железистая цементирующая масса обычно сложена дисперсным и сгустковым колломорфно-афанитовым, реже пизолитовым, железистым или глинозем-железистым материалом, представленным ферри- и гематогелем, реже — ферриалюмогелем. Нередко среди этого материала наблюдаются скопления и единичные включения новообразованных кристалликов гипбсита, характеризующихся полисинтетическим двойникованием. Материал железистой цементирующей массы не только заполняет пространство между фрагментами псевдобрекчии, но и замещает их, развиваясь в виде лапчатых выделений. Железистая цементирующая масса разъедает и замещает не только фрагменты, но и гелеморфную цементирующую массу, сложенную алюмогелем. Переходы при замещении нередко «размытые», постепенные. При развитии ожелезнения алюмогель становится палево-желтым, сменяется желтым и переходит постепенно в практически оптически непрозрачные массы ферри- и гематогеля. При ожелезнении бокситов увеличивается их кавернозность и размер каверн, достигающий 1—2 см (шлиф 2GPD0055/3.0-3.5, рис. 3). Стенки каверн обычно сложены ферригелем, нередко крустифицированы кристалликами гетита и гидрогетита размером до 0,5—1 мм. Гетит в зернистых агрегатах диагностируется легко, обладая чрезвычайно сильной дисперсией оптических осей. Иногда на стенках каверночек наряду с железистым материалом встречаются новообразованные кристаллики гипбсита размером до 1 мм. При усилении замещения обломочной, существенно гипбситовой, части структурных бокситов они постепенно сменяются железистыми латеритами, к которым мы условно относим породы, в которых содержание бокситовых реликтовых фрагментов составляет менее 30%.

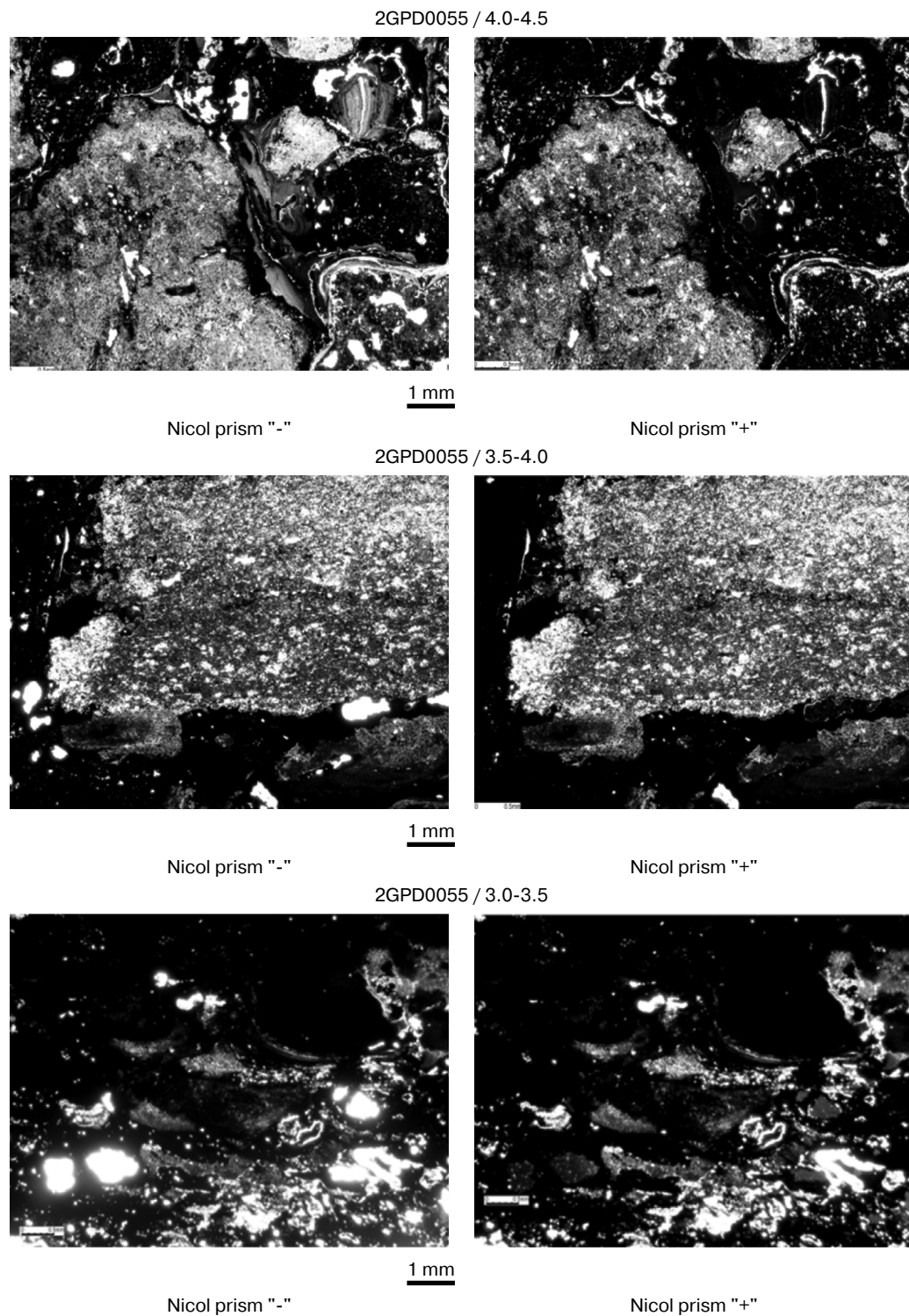


Рис. 3. Фотографии шлифов 2GPD0055/4.0-4.5, 2GPD0055/3.5-4.0, 2GPD0055/3.0-3.5
[**Fig. 3.** Photos of thin rock sections 2GPD0055/4.0-4.5, 2GPD0055/3.5-4.0, 2GPD0055/3.0-3.5]

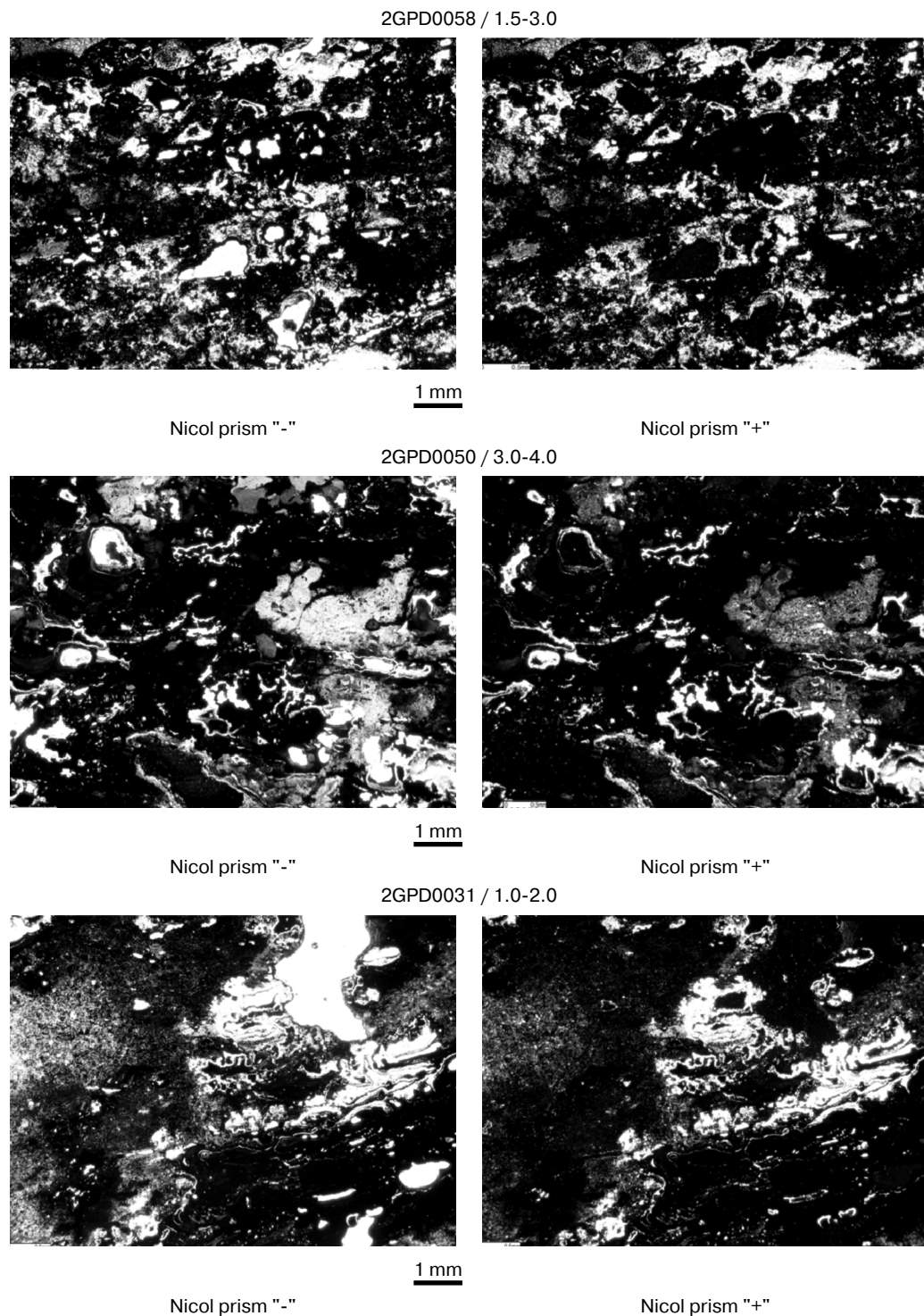


Рис. 4. Фотографии шлифов 2GPD0055/0.0-1.0, 2GPD0058/1.5-3.0, 2GPD0050/3.0-4.0, 2GPD0031/1.0-2.0 (окончание)
[Fig. 4. Photos of thin rock sections 2GPD0055/0.0-1.0, 2GPD0058/1.5-3.0, 2GPD0050/3.0-4.0, 2GPD0031/1.0-2.0]

III. Бокситы гелеморфные с микролитами по алевро-аргиллитам

Эти бокситы в шлифах (2GPD0026/7.8-8.0, рис. 5) имеют псевдомикробрекчиевую кавернозную текстуру. Псевдобрекчиевая текстура (или хемобрекчия), поскольку брекчирование связано с хемогенными процессами замещения и перераспределения вещества вдоль трещин и микротрещин, а не с осадочными процессами. Фрагменты в одном николе бесцветны, тогда как цементирующая масса светло-серая, полупрозрачная. Участками по прожилкам развито ожелезнение — побурение породы.

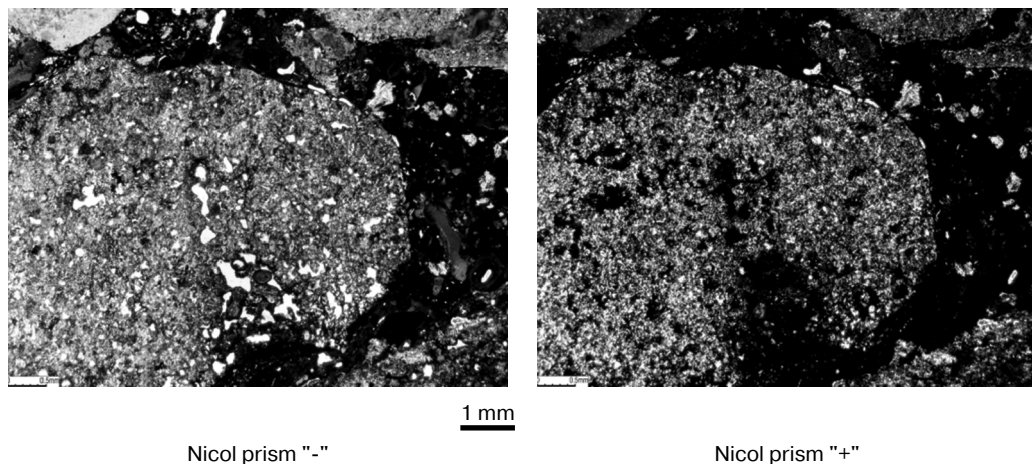


Рис. 5. Фотография шлифа 2GPD0026/7.8-8.0
[**Fig. 5.** Photo of thin rock section 2GPD0026/7.8-8.0]

Размер фрагментов составляет от 1—2 до 5 мм. Они имеют кристаллически-зернистую структуру с размером кристалликов до 0,1 мм. Текстура пород в обломках полосчатая, реже массивная. Фрагменты сложены в основном микро-, тонкокристаллическим гиббситом, представленным изометричными выделениями. Среди гиббситовой основной массы рассеяны тончайшие зерна гетита, составляющие не более 10—15% породы. Этот гетит участками придает породе палево-желтый цвет в одном николе. Гематит, по-видимому, слагает удлиненные зерна, образующие равномерную, реже неравномерную вкрапленность в породе. Содержание гематитовых зерен составляет первые проценты. Развита иголки рутила. Участками в микро-, тонкокристаллической гиббситовой массе появляются сгустки размером первые миллиметры, колломорфные выделения афанитовой полупрозрачной белой массы, близкого к бемиту состава. Изредка встречаются микролиты, также сложенные алюмогелем. Цементирующая и обволакивающая фрагменты масса составляет ~40% шлифа. Имеет массивную кавернозную, пористую текстуру и афанитовую колломорфную структуру. Размер пор составляет 1—2 мм, достигая изредка 4—5 мм. Эта масса сложена полупрозрачным алюмогелем грязного светло-серого цвета и имеет массивную афанитовую, с зачатками микролитов текстуру и пелитоморфную до афанитовой колломорфной структуру. Алюмогель имеет состав, близкий к бемиту. Местами алюмогель подвергается раскристаллизации и тогда имеет микро-, тонкозернистое

строение, эти участки сложены гиббситом. Шлиф пересечен тонкими трещинками шириной до 0,2 мм, вокруг которых развито ожелезнение — ферриалюмогель до ферригеля. Визуально оно проявлено в развитии побурения алюмогеля и существенно гиббситовой массы вокруг трещинок.

IV. Латерит-бокситы (низкокачественные бокситы) по алевро-аргиллита

Эти бокситы в шлифах имеют псевдомикробрекчиевую, участками кавернозную текстуру (рис. 6). Псевдобрекчиевая текстура (или хемобрекчия), поскольку брекчирование связано с хемогенными процессами замещения и перераспределения вещества вдоль трещин и микротрещин, а не с осадочными процессами. Фрагменты в одном никеле пятнистые, что обусловлено чередованием темно-бурых до черных (непрозрачных) и палево-желтых участков. Цементирующая масса имеет очень насыщенный темно-бурый, красный до черного (непрозрачный) цвет. Размер фрагментов составляет от 1—2 до 10 мм. Фрагменты имеют кристаллически-зернистую структуру с размером зерен от пелитовой до алевритовой размерности, местами сохраняется реликтовая обломочная алевритовая структура, унаследованная от исходных алевролитов. Текстура пород в обломках полосчатая, реже массивная. Фрагменты сложены в основном микро-, тонкокристаллическим гиббситом (50—70%) с тончайшей сыпью гетита и сгустками гематогеля или гематита (30—50%). Выделения минералов имеют изометричную форму. В краевой части фрагменты подвергаются ожелезнению — разъедаются железистым цементом. Цементирующая фрагменты железистая масса имеет массивную кавернозную, пористую текстуру и афанитовую колломорфную структуру. Размер пор до 1—2 мм. Их количество составляет ~20—30%. Цементирующая масса обычно сложена дисперсным и сгустковым колломорфно-афанитовым ферри- и гематогелем. Участками среди этого материала наблюдаются скопления и единичные включения новообразованных кристалликов гиббсита, характеризующихся полисинтетическим двойникованием. Материал железистой цементирующей массы не только заполняет пространство между фрагментами псевдобрекчии, но и замещает их, развиваясь в виде лапчатых выделений.

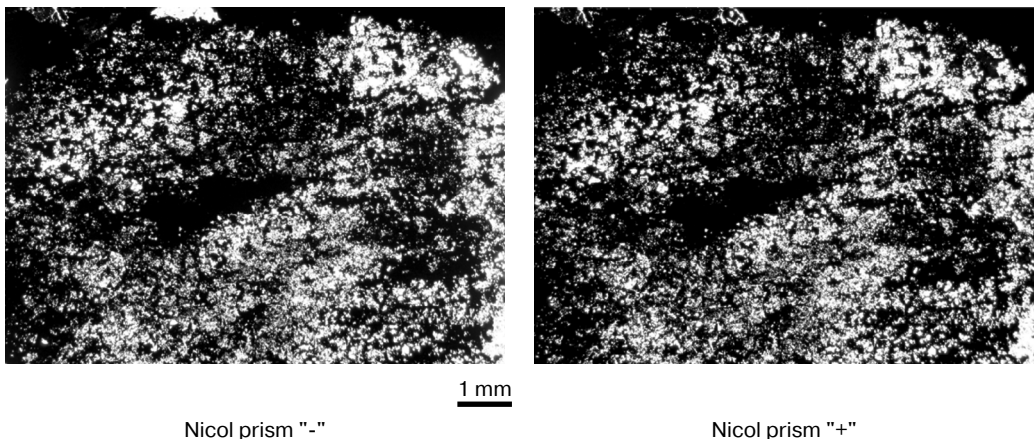


Рис. 6. Фотография шлифа 2GPD0050/7.0-8.0
[**Fig. 6.** Photo of thin rock section 2GPD0050/7.0-8.0]

ственно меньшей степени) гематогелем, образующем ритмично-зональные выделения, выстилающие стенки трещин и каверн. Ферри- и гематогель также разъедают и замещают с реликтовые обломки бокситов, сглаживая и обволакивая их, а также формируя железистые пизолиты. Стенки крупных каверн, которые образуются в центральной части прожилков железистых латеритов, нередко выстланы мелкокристаллическим гиббситом или почками ферригеля. Иногда среди железистых минералов встречаются участки палево-желтого ферриалюмогеля и алюмогеля, а также зерна кварца алевритовой размерности, интенсивно корродированные железистым материалом. Обычно также развиты агрегаты и отдельные крупные кристаллы вторичного новообразованного гиббсита размером до 2—3 мм. Реликтовый материал представлен ожелезненными фрагментами структурных гелефицированных и микролитовых бокситов размером до 5—7 мм. Микоолитовые бокситы сложены алюмогелем, а структурные агрегатом микро- до мелкокристаллического гиббсита с примесью палево-желтого гетита. Описание таких бокситов дано выше. Ожелезнение фрагментов проявляется в развитии гетита, представленного коричневыми хлопьевидными выделениями, или гематита, представленного вытянутыми зернами размером до 1—2 мм. В зависимости от преобладания того или иного минерала обломки приобретают желтый или красный оттенок в одном николе.

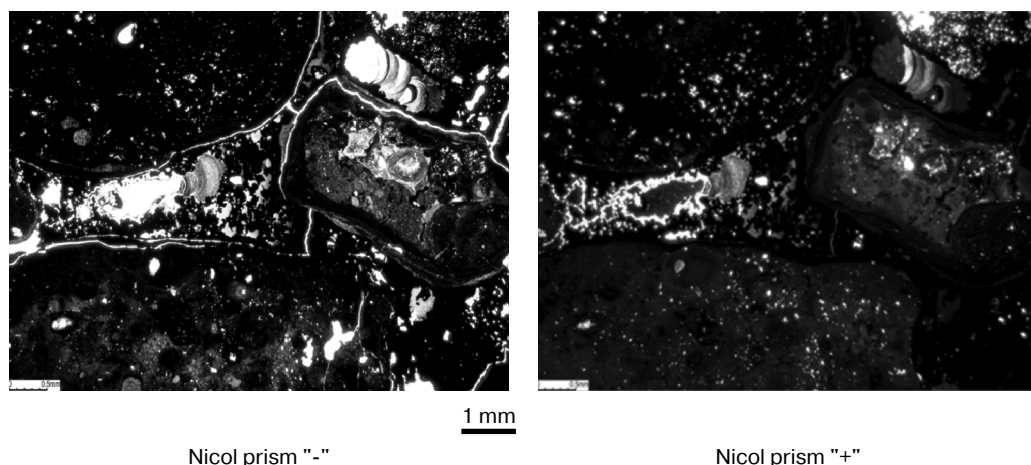


Рис. 8. Фотография шлифа 2GPD0029/0430
[Fig. 8. Photo of thin rock section 2GPD0029/0430]

VII. Железистые латериты верхней части переходного горизонта по алевро-аргиллитам

Железистые латериты переходной зоны в шлифах имеют псевдобрекчиевую текстуру замещения (рис. 9). Фрагменты имеют размер от 1—2 до 10 мм и остроугольную форму. Цвет фрагментов, обычно очень насыщенный, темно-красный, местами они становятся непрозрачными в проходящем свете. Цементирующая масса имеет желтый, желтовато-красный цвет и очень неоднородна.

Фрагменты имеют массивную или полосчатую текстуру, колломорфно-афанитовую и местами микро-, тонкозернистую структуру. Они сложены большей

гелем, реже алюмогелем, которые образуют колломорфные ритмично-зональные выделения, заполняющие прожилки. Нередко наблюдается раскристаллизация ферриалюмогеля с образованием тонкозернистого агрегата гиббсита с гетитом и гематитом. Стенки каверн, нередко характерных для цементирующей массы, обычно сложены светлым палево-желтым до молочно-белого алюмогелем или — реже — кристалликами сдвойникового гиббсита. Рентгеновские исследования показывают, что содержание бемитовой составляющей в ферриалюмогеле и алюмогеле пород переходной зоны обычно невелико. Участками встречены корродированные зерна кварца алевритовой размерности.

Выводы

В результате проведенного исследования были получены закономерности изменения вещественного состава пород в профиле коры выветривания и в различных литолого-генетических типах бокситов:

1) содержание, тип и состав глиноземистых и глиноземсодержащих минералов контролируется прежде всего литолого-генетическими типами бокситов, которые легко визуально определяются и картируются на бовали. Поэтому еще на стадии картировки можно оценить вещественный состав;

2) классические латеритные бокситы относительно просты по минеральному составу — они сложены преимущественно гиббситом, гетитом-алюмогетитом и гематитом. Содержание бемита в них не более 1%. Алюмогетит в этих бокситах малоглиноземистый, содержание диаспорового минерала в нем не превышает 20%;

3) гелеморфные и гелефицированные бокситы сложены гиббситом, бемитом, гетитом-алюмогетитом, гематитом. Алюминий также входит в состав гидроокислов титана-алюминия-железа. Содержание бемита в этих бокситах выше, чем в классических латеритных и достигает 3%. Алюмогетит этих бокситов высокоглиноземистый — с содержанием $AlO(OH)$ до 27—30%;

4) состав алюмогетита зависит не только от литологии бокситов, но и от положения в разрезе коры выветривания. Наиболее глиноземистый алюмогетит развит в бокситовом горизонте и в глиноземистых прожилках верхней части переходного горизонта. Его образование обязано глиноземистому метасоматозу. В верхней части бокситового горизонта, где преобладает железистый метасоматоз, глиноземистость алюмогетита падает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Крятов Б.М., Прокофьев С.С., Макстенек И.О., Мамедов В.И., Хаин В.Е. Этапы тектонического развития и металлогенические особенности Запада Леоно-Либерийского щита (Западная Гвинея и Гвинея-Бисау) // Геотектоника. 1985. № 6. С. 43—61.
- [2] Mamedov V.I., Boufeev Y.V., Nikitine Y.A. Geologie de la republique de Guinee. Min. des Mines et de la Geologie de la Rep. De Guinee; GEOPROSPECTS Ltd; Univ. d'Etat de Moscou Lomonossov (Fac. Geol.) Conakry — Moscow: Aquarel, 2010. 320 p.
- [3] Мамедов В.И., Макарова М.А., Корреа Гомеш Ж., Чаусов А.А., Оконов Е.А., Лопухин М.В. Особенности бокситоносных латеритных покровов района Сангареди (Гвинейская республика) // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 7 (49). С. 114—135. DOI: 10.18454/IRJ.2016.49.178

- [4] *Mamedov V., Zmeev V., Tokarlikov V., Samokhvalov M., Kopilov A.* Rapport final sur les résultats des travaux d'exploration du territoire de la concession (décembre 1997 — décembre 2000). Conakry: Geoprospects LTD, 2001.
- [5] *Мамедов В.И., Хмельницкий А.Ф.* Петрографическая и минералого-геохимическая характеристики комплексов пород западной части Гвинейской Республики. Конакри, 1988.
- [6] *Середкин М.В., Токарликов В.П., Чаусов А.А. и др.* Отчет о результатах специальных исследований, проведенных на месторождении Koulore с августа 2004 по декабрь 2004. Конакри: Геопроспект, 2004.

© Туре Л., Чаусов А.А., Котельников А.Е., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 18 декабря 2017

Дата принятия к печати: 15 апреля 2018

Для цитирования:

Туре Л., Чаусов А.А., Котельников А.Е. Петрографическая характеристика бокситов месторождений рудного поля Кулоре (Koulore) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 325—342. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-325-342

Сведения об авторах:

Люсьен Туре — студент магистратуры департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* геология, бокситы, петрография. *Контактная информация:* e-mail: kotelnikov_ae@rudn.university

Чаусов Алексей Александрович — операционный директор, ООО «Геопроспект». *Область научных интересов:* геология, бокситы. *Контактная информация:* e-mail: kotelnikov_ae@rudn.university

Александр Евгеньевич Котельников — кандидат геолого-минералогических наук, доцент департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* геология, месторождения полезных ископаемых, поиски месторождений. *Контактная информация:* e-mail: kotelnikov_ae@rudn.university

Petrographic characteristic of bauxites of the Koulore ore field

L. Toure¹, A.A. Chaousov², A.E. Kotelnikov¹

¹ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

² Geoprospects LTD

Commune of Ratoma, Kaporó district, Conakry, B.P 6789, Republic of Guinea

Abstract. As a result of studying geological structure of deposits located in the Koulore ore field, basic cross-section layers have been established: bedrock, transitional horizon and laterite cover. The laterite cover consists of the lower part presented by polymineral and kaolin clays and the top — the

bauxite horizon — laterite cover itself, which generally contains hydroxides and oxides of iron and aluminum. The bauxite horizon has a zone structure: in the lower part of the bauxite horizon — zone of light bauxites, and in the top part of the bauxite horizon — zone of the red bauxites. As a result of microscopic study of various samples of residuum, several kinds of rocks which are characterized by similar structural and textural parameters have been identified. The rocks have been grouped by classes: gelified patterned bauxites on silt-rich mudstone, gelified bauxites on dolerites, gel-morphous bauxites with crystalloids on silt-rich mudstone, laterite bauxites (low-quality bauxites) on silt-rich mudstone, laterite bauxites (low-quality bauxites) on dolerites, ferruginous laterites — cuirass on silt-rich mudstone, ferruginous laterites of the top part of the transitional horizon on silt-rich mudstone. Lithological and genetic types of bauxites control the type and composition of aluminiferous minerals. Mineral composition of classical lateritic bauxites mainly contains gibbsite, goethite-alumogothite, and hematite with less 1% of boehmite. Gel-morphous and gelified bauxites consist of gibbsite, boehmite, goethite-alumogothite, hematite. Content of boehmite reaches 3% that is more than in classic lateritic bauxites. The composition of the alumogothite depends not only on lithology of bauxites, but also on position in the residuum section.

Key words: residuum section, bauxite, laterite, petrography

REFERENCES

- [1] Kryatov B.M., Prokofev S.S., Makstenek I.O., Mamedov V.I., Khain V.E. Etapy tektonicheskogo razvitiya i metallogenicheskie osobennosti Zapada Leono-Liberiiskogo shchita (Zapadnaya Gvineya i Gvineya-Bisau) [Stages of tectonic development and metallogenetic features of the West Leone-Liberian shield (Western Guinea and Guinea-Bissau)]. *Geotektonika [Geotectonics]*. 1985. 6: 43—61. (In Russ.)
- [2] Mamedov V.I., Boufeev Y.V., Nikitine Y.A. *Geologie de la republique de Guinee. Min. des Mines et de la Geologie de la Rep. De Guinee*; GEOPROSPECTS Ltd; Univ. d'Etat de Moscou Lomonossov (Fac. Geol.) Conakry — Moscou: Aquarel, 2010. 320 p.
- [3] Mamedov V.I., Makarova M.A., Korrea Gomesh G., Chausov A.A., Okonov E.A., Lopukhin M.V. Osobennosti boksitonosnyh lateritnyh pokrovov rayona Sangaredi (Gvineyskaya respublika) [Bauxite-bearing lateritic covers of Sandaredi area, Republic of Guinea. International Research Journal]. № 7 (49). Part 4. 114—135. <http://dx.doi.org/10.18454/IRJ.2016.49.178> (In Russ.)
- [4] Mamedov V., Zmeev V., Tokarlikov V., Samokhvalov M., Kopilov A. *Rapport final sur les résultats des travaux d'exploration du territoire de la concession (décembre 1997 — décembre 2000)*. Conakry: Geoprospects LTD, 2001.
- [5] Mamedov V.I., Khmelnytsky A.F. Petrograficheskaya i mineralogo-geokhimicheskaya kharakteristiki kompleksov porod zapadnoi chasti Gvineiskoi Respubliki, Konakri [Petrographic and mineralogic-geochemical characteristics of rock complexes of the western part of the Republic of Guinea, Conakry]. 1988. (In Russ.)
- [6] Seredkin M.V., Tokarlikov V.P., Chausov A.A., et al. Otchet o rezul'tatakh spetsial'nykh issledovaniy, provedennykh na mestorozhdenii Kouloire s avgusta 2004 po dekabr' 2004 [Report on the results of special research conducted on the Kouloire field from August, 2004 to December, 2004]. Conakry: Geoprospects LTD, 2004. (In Russ.)

Article history:

Received: December 18, 2017

Accepted: April 15, 2018

For citation:

Toure L., Chausov A.A., Kotelnikov A.E. (2018). Petrographic characteristic of bauxites of the Kouloire ore field. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(3), 325—342. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-325-342

Bio Note:

Lucien Toure — graduate student, Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering, Engineering academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* geology, bauxite, petrography. *Contact information:* e-mail: kotelnikov_ae@rudn.university

Alexey A. Chausov — Director of Operations, Geoprospects LTD. *Research interests:* Geology, bauxite. *Contact information:* e-mail: kotelnikov_ae@rudn.university

Alexander E. Kotelnikov — PhD in Geology, Assistant Professor, Department of Geology, mining and oil and gas engineering, Engineering academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* geology, mineral deposits, search of deposits. *Contact information:* e-mail: kotelnikov_ae@rudn.university



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-343-357

УДК 622.691.24:624.953 (470.26)

Применение фильтрационных исследований для изучения технологий разработки месторождений нетрадиционных коллекторов и трудноизвлекаемых запасов нефти

И.Е. Белошапка, Д.И. Ганиев

Альметьевский государственный нефтяной институт
Российская Федерация, 423452, Альметьевск, ул. Ленина, 2

В настоящее время повсеместно происходит истощение основных запасов легких углеводородов, в связи с чем все больше нефтяных компаний обращают внимание на возможность разработки нетрадиционных коллекторов и трудноизвлекаемых запасов. Очевидно, что на данном этапе развития технологий разработки нефтяных месторождений рентабельная выработка нетрадиционных коллекторов невозможна, в связи с этим возникает необходимость новых методов добычи нефти. При этом важную роль играет правильная постановка и проведение лабораторных экспериментов, так как принимаемые по их результатам решения влияют на технологические и экономические показатели. К таким исследованиям относятся и фильтрационные эксперименты по определению коэффициента вытеснения нефти из керна в лабораторных условиях. При проведении фильтрационных экспериментов важным моментом является правильная постановка эксперимента, которая невозможна без проработанной методики и нормативно-технических документов. На сегодняшний день исследования по определению коэффициента вытеснения нефти регламентируются ОСТ 39-195-86, утвержденным в 1986 г. Однако большинство пунктов документа нуждается в изменении и доработке в связи с совершенствованием оборудования и методов подготовки керна для снижения погрешностей на различных этапах проведения эксперимента и более точной оценкой коэффициента вытеснения при определении эффективности разрабатываемых технологий.

Ключевые слова: фильтрация, кернаый материал, коэффициент вытеснения, отраслевой стандарт, экстракция, проницаемость

Методы проведения исследований

В настоящее время определение коэффициента вытеснения путем проведения фильтрационного эксперимента регламентируется ОСТ 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента нефти водой в лабораторных условиях (Стандарт), согласно которому определение коэффициента вытеснения производится на насыщенный керосином керна, предварительно полностью проэкстрагированном и высушенном [1]. **Цель данной работы** — определение недостатков Стандарта и составление рекомендаций по его изменению, для чего авторами было проведено несколько десятков экспериментов, в том числе для улучшения существующей нормативно-технической документации. Согласно Стандарту восстановление

смачиваемости производится в течение 16—24 ч. Исследованиями, выполненными группой авторов в 2012 г. [2], установлено, что данный период достаточен для восстановления смачиваемости, так как значительное изменение смачиваемости происходит в первые 24 ч при пластовых условиях, а дальнейшее увеличение времени выдержки образцов под давлением несущественно влияет на изменение смачиваемости. Однако группой исследователей [3] было установлено, что длительность «старения» керна должна составлять от нескольких недель до нескольких месяцев, или же необходимо применять методы «мягкой» экстракции с использованием таких растворителей, как гептан или алкан, которые не влияют на изменение поверхностных свойств породы, что дает основания для изменения стандарта [4], предусматривающего использование спирто-бензольной смеси или четыреххлористого углерода при экстрагировании. Хижняк Г.П. доказано, что применение неэкстрагированного керна для сохранения естественной смачиваемости только снижает достоверность определения коэффициента вытеснения, так как нефть, содержащаяся в породе, после длительного хранения теряет большинство легких углеводородов, и происходит процесс ее окисления. Кроме того, из-за испарения пластовой воды происходит осаждение кристаллов солей в поровом пространстве. В результате снижается динамическая пористость керна, увеличивается вязкость нефти. Это особенно важно при проведении исследований низкопроницаемого керна, в том числе доманиковых отложений, так как любые ухудшения фильтрационных свойств керна оказывают существенное влияние на результат эксперимента с ядерным материалом по сравнению с традиционными коллекторами.

Согласно Стандарту, при проведении фильтрационных исследований рекомендовалось использовать пластовую воду, либо ее модель. Однако при этом не учитывался тот факт, что вода, применяемая для заводнения нефтяных пластов, согласно действующим нормативно-техническим документам [5—14], может оказывать негативное влияние на конечный результат проводимого эксперимента, снижая динамическую пористость в результате коагулирования каналов фильтрации механическими примесями, частицами эмульгированной нефти, выпадением осадков солей и др. Все перечисленные факторы могут исказить результаты проведенного эксперимента или привести к неисправности используемого оборудования. В связи с этим необходимо изменить требования к используемой для проведения фильтрационных экспериментов модели воды.

Также необходимо ужесточение требований к измерению температуры. Указанная в Стандарте погрешность в ± 1 °С является довольно существенной для отдельных случаев изменения температуры в указанном диапазоне, что значительно влияет на вязкость нефти и, как следствие, на коэффициент ее вытеснения. К тому же современное оборудование позволяет поддерживать стабильную температуру с погрешностью $\pm 0,1$ °С. Уменьшение интервала погрешности температуры позволит улучшить воспроизводимость экспериментов по фильтрации флюидов.

Предлагается изменение требований к материалам, из которых изготавливаются части оборудования, контактирующие с флюидами. В отличие от рекомен-

дации Стандарта, в соответствии с которыми применялись медные трубки и трубки из сплава никеля, предложено исключить использование меди, так как данный металл, контактируя с углеводородами, окисляется с последующим выпадением окислов в осадок, которые, в свою очередь, могут заблокировать каналы фильтрации либо привести к неисправности оборудования. Любое изменение формы и путей фильтрации в низкопроницаемых ядрах, в том числе и доманиковых, оказывает гораздо более существенное влияние на конечный результат, чем при использовании традиционных ядер. Также согласно Стандарту при температурах испытания более 75 °С рекомендовалось использовать термостойкую резину или сплав из нескольких металлов — олова, висмута и свинца. Однако данный сплав обладает достаточно низкой температурой плавления, в ряде случаев ниже температуры кипения воды. Использование низкотемпературного сплава при высокотемпературных экспериментах с вытеснением паром может привести к неисправности используемого оборудования.

В Стандарте для исключения разрушения образцов в момент испытания и возникновения дополнительных пустот между испытываемыми образцами ядра рекомендовалось использование фильтровальной бумаги между образцами в манжете, или заполнение пустот измельченной породой. Все вышесказанное также снижает качество проводимых экспериментов. Для этого дополнительно предлагается включить следующие требования по геометрической форме:

- допустимое отклонение диаметра образца не более ± 1 мм;
- торцевые поверхности образца должны быть плоскими, параллельными друг другу и перпендикулярными боковой поверхности. Допустимое отклонение от плоскости $\pm 0,05$ мм, параллельности $\pm 0,4$ мм, перпендикулярности ± 1 мм;
- отсутствие сколов на торцах (не более 1,5 мм), каверн на боковой поверхности, видимых трещин.

Были проведены эксперименты по определению коэффициента вытеснения на одинаковом ядре с использованием нефти с разных скважин: первый опыт проводился с нефтью из той же скважины, что и ядро, а второй опыт — с нефтью из другой скважины, но аналогичной по реологическим свойствам [15]. Конечные коэффициенты вытеснения сильно отличались. В связи с этим предлагается использовать при фильтрационных исследованиях образцы проб нефти из той же скважины, откуда был извлечен ядерный материал.

Необходимо пересмотреть постановку фильтрационного эксперимента в п. 4.12.3 Стандарта, в котором рекомендуется десятикратное увеличение скорости вытеснения. По мнению В.В. Колпакова и др. [16], составители Стандарта опирались на Д. Амикс и др., предложивших увеличение скорости фильтрации при использовании одного образца ядра или короткой насыпной модели пласта, которые считали, что относительная проницаемость при высоких градиентах давления не зависит от градиента [17]. Другие авторы утверждали, что при высоком градиенте давления возникают большие скорости потока, в результате чего происходит отклонение от закона Дарси из-за появления инерционных эффектов [18]. Таким образом, Стандарт нуждается в доработке и актуализации постановки фильтрационного эксперимента.

Дополнительно необходимо исключить из набора оборудования для фильтрационных экспериментов бюретки высокого давления и специальный жидкостный контейнер в связи с утратой актуальности перечисленного оборудования и внедрением автоматических регуляторов противодействия, которые позволяют исключить из системы измерения лишние единицы оборудования, тем самым снизив погрешность измерения. Для замены предлагается использовать мерные бюретки-сепараторы с ценой деления не более 0,2 мл; кроме того, рекомендуется применять ультразвуковые, оптические и другие автоматические сепараторы, исключающие человеческий фактор при измерении.

Оборудование, используемое для проведения исследований

Стандарт был разработан для исследований на установке УИПК-1М, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

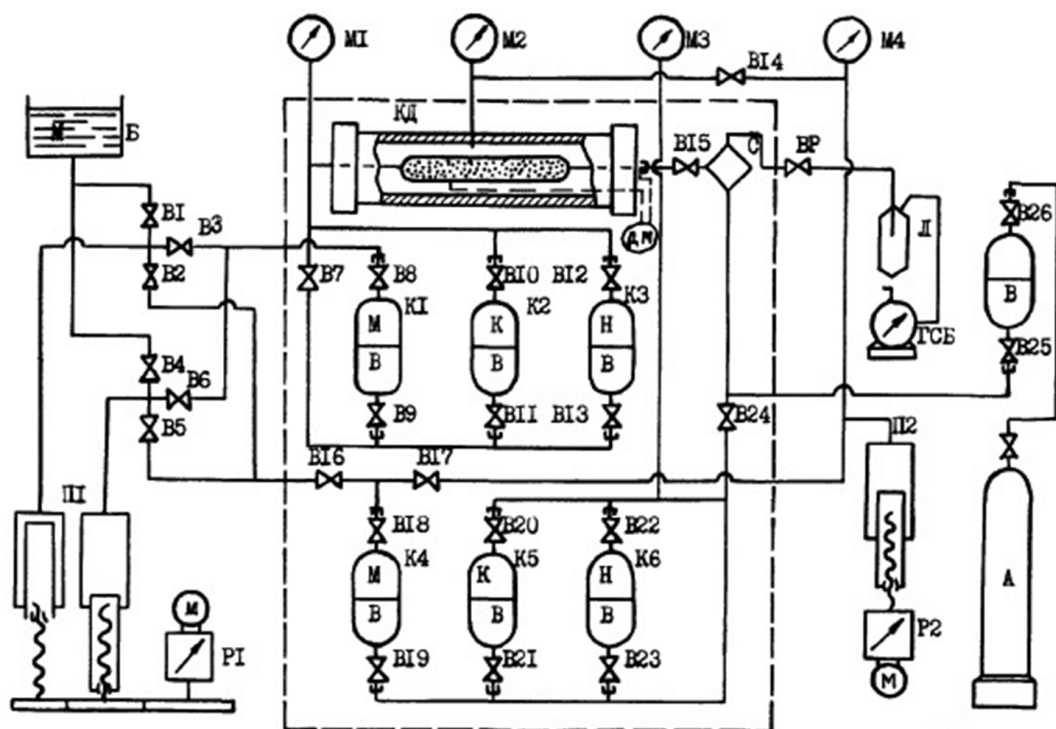


Рис. 1. Принципиальная схема соединения узлов установки для определения коэффициента вытеснения нефти водой по ОСТ 39-195-86:

КД — кернодержатель; К1—К6 — контейнеры жидкостные; М1—М4 — манометры образцовые; В1—В26 — вентили игольчатые; ВР — вентиль регулируемый; С — контейнер жидкостный специальный (или бюретка высокого давления); Л — мерная бюретка-сепаратор; ГСБ — газовый счетчик барабанный; П1 — пресс с регулируемым редуктором и реверсивным электродвигателем; П2 — пресс с реверсивным электродвигателем; Б — масляный бачок; Р1 — редуктор регулируемый; Р2 — редуктор; М — масло; К — керосин; Н — нефть; В — вода; А — азот; м — мотор; дм — дифманометр

[Fig. 1. Schematic diagram of equipment units connection for determining the displacement of oil by water ratio in accordance with IST 39-195-86]

К существенным недостаткам данной схемы относятся следующие:

- все существующее оборудование аналогового типа, ручные краны;
- отсутствуют такие важные элементы, как регулятор противодавления;
- не предусмотрено термостабилизирование всей системы;
- велико влияние человеческого фактора.

На сегодняшний день все ведущие производители фильтрационных установок, как отечественные, так и зарубежные, используют схожую принципиальную схему построения оборудования для подобных экспериментов, но по сравнению с УИПК-1М оборудование автоматизировано и исключает большинство недостатков первых установок.

На европейском рынке одним из лидирующих производителей является Vinci Technologies компаний и разработанный ими лабораторно-измерительный комплекс CFS-700 (рис. 2), предназначенный для проведения фильтрационных исследований с использованием образцов керна для обоснования данных при проектировании разработки месторождений. Комплекс позволяет проводить исследования таких параметров, как начальная фазовая проницаемость нефти, остаточная нефтенасыщенность, фазовая проницаемость по воде, коэффициент вытеснения нефти [19].

На американском рынке лидером в производстве петрофизического оборудования является Core Lab Instruments (рис. 3). Для проведения фильтрационных исследований компания производит автоматизированные фильтрационные системы для исследования пластовых условий заводнения с модульной компьютеризованной системой, сконфигурированной для исследования проницаемостей по жидкости, исследований по закачке химикатов и растворителей, а также тестирования относительной проницаемости жидкость/жидкость и жидкость/газ при нестационарном заводнении [20].

На отечественном рынке ведущей компанией в производстве оборудования для исследования керна является АО «Геологика».

Установка для исследования керна для высокотемпературных исследований в кислотостойком исполнении ПИК-ОФП/ЭП-К-Т (рис. 4) может работать в автоматическом и ручном режимах и предназначена для проведения как стандартных, так и специализированных экспериментов [21].

Установка позволяет определять следующие параметры:

- электрическое сопротивление;
- время распространения продольных и поперечных ультразвуковых волн;
- коэффициент открытой пористости в пластовых условиях;
- изменение коэффициента открытой пористости в зависимости от изменения пластовых условий;
- коэффициент проницаемости по жидкости;
- коэффициент вытеснения нефти водой, паром;
- коэффициент фазовых проницаемостей по жидкости.

Для качественной оценки изменения фильтрационно-емкостных свойств без разрушения породы посредством давления или фильтрации дополнительно могут быть применены томографические исследования, основанные на том, что рентгеновские лучи при прохождении сквозь породу теряют мощность пропорционально ее плотности и регистрируются на матрице приемника. После обработки полученных снимков создается 3D-модель породы [22].

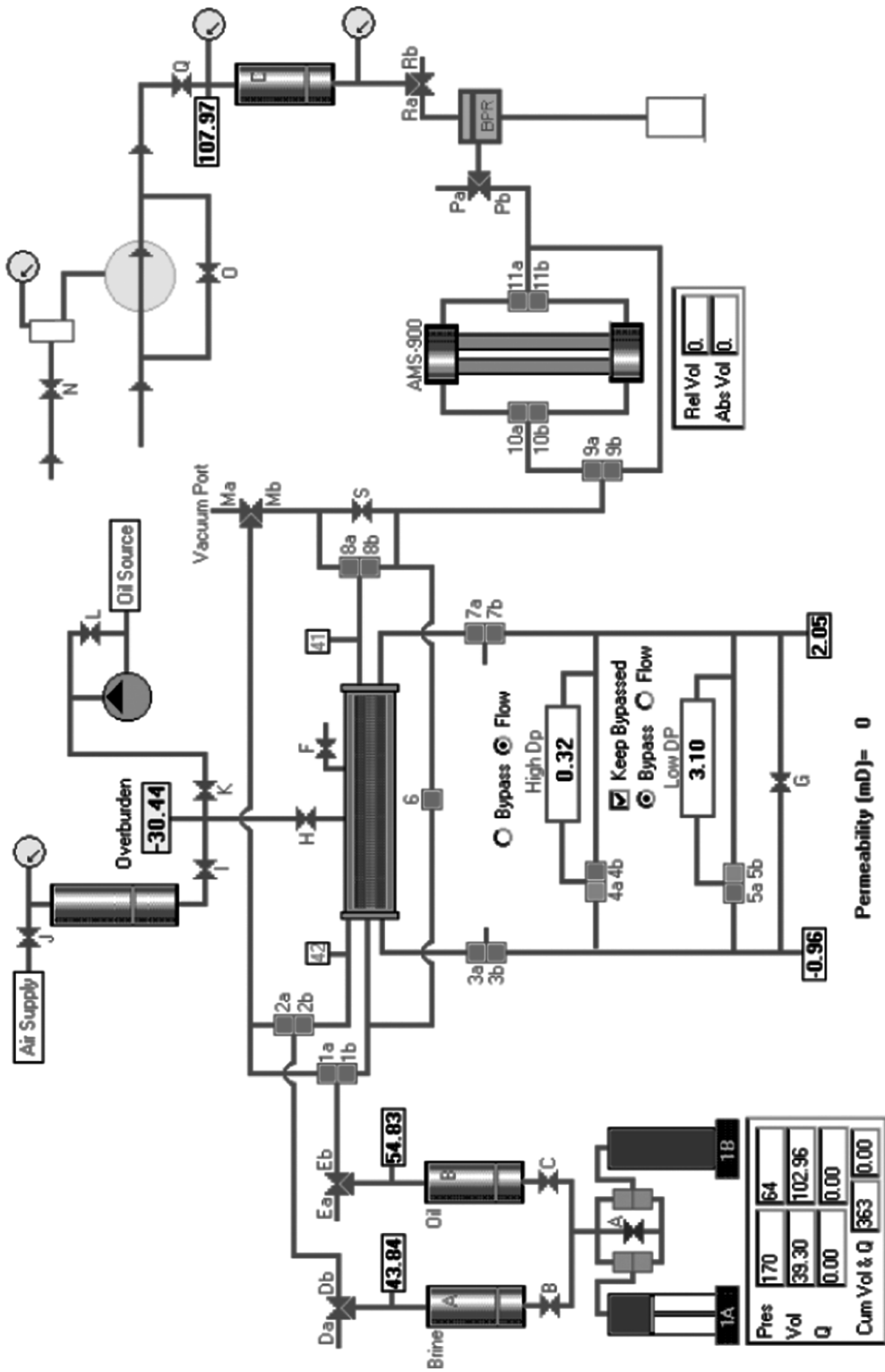


Рис. 3. Принципиальная схема фильтровой установки Core Lab AFS-300
[Fig. 3. Schematic diagram of the Core Lab AFS-300 filtration unit]

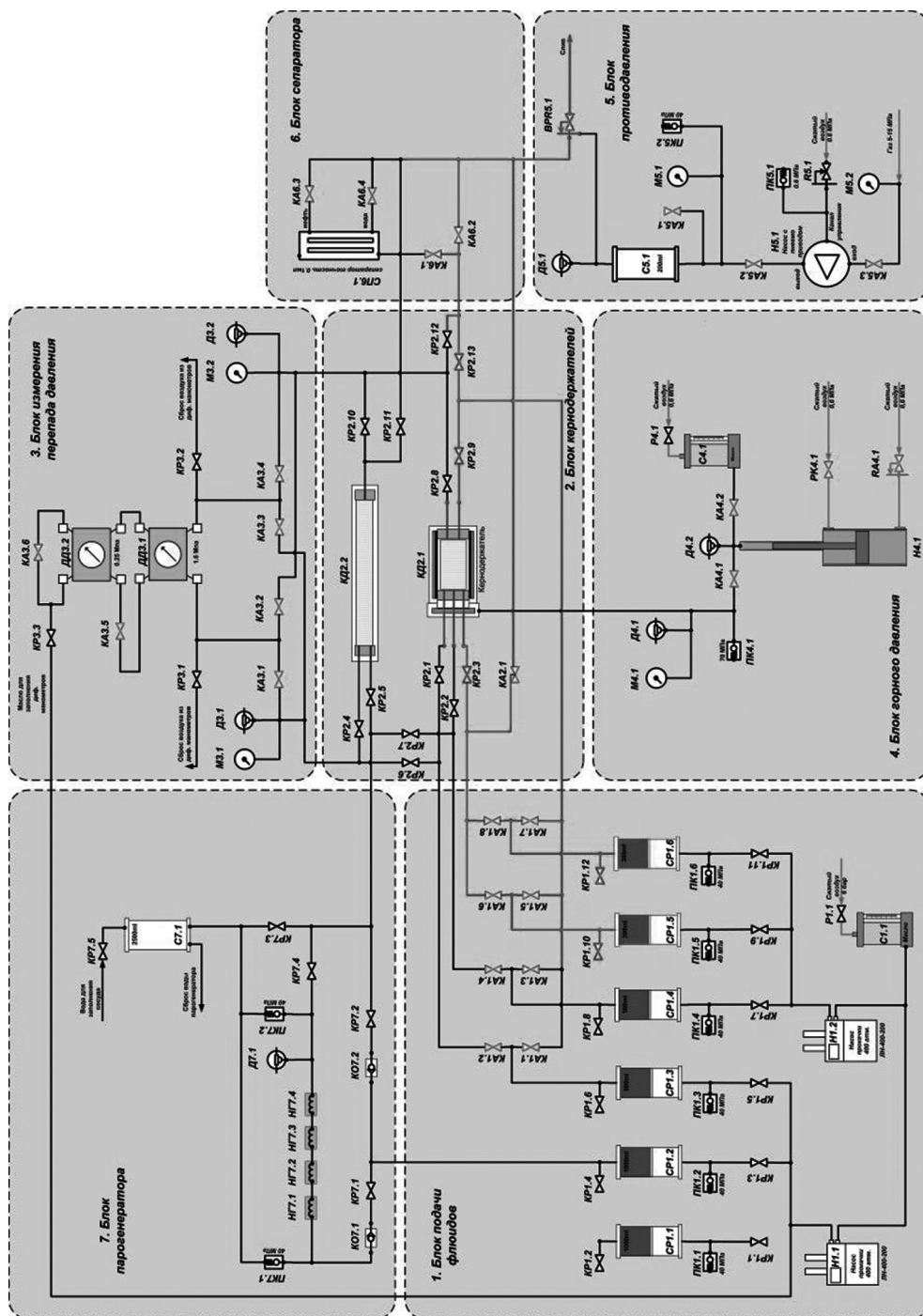


Рис. 4. Гидравлическая схема фильтровой установки Геологика ПИК-ОФП/ЭП-К-Т
 [Fig. 4. Hydraulic circuit of the Geologika PIK-OFP/EP-K-T filtration unit]

Рентгеновская томография породы позволяет оценить фильтрационно-емкостные свойства, выделить поры, трещины, каверны, распределить включения по плотности материала [23]. Совместное использование фильтрационной установки для проведения кислотных обработок и томографа позволяет оценить эффективность проведенной технологии, проследив изменение пористости, проницаемости исследуемого керна.

Отметим, что в документе Стандарте вообще не учитываются возможности использования неконсолидированного керна, что не соответствует современным технологиям добычи нефти из нетрадиционных коллекторов, керн которых, в свою очередь, может быть неконсолидированным, как в битуминозных отложениях, или легкоразрушаемым в ходе проведения экспериментов. Поэтому необходимо дополнить Стандарт единой методикой, которая должна содержать требования к насыпной модели, неконсолидированному керну, рабочим агентам (в том числе к пару), проведению эксперимента с насыпной моделью, сбор и обоснование результатов.

Выводы

Таким образом, в Стандарт, регламентирующий исследования по определению коэффициента вытеснения нефти, предлагается внести следующие поправки:

— изменить требования по подготовке керна материала, а именно: заменить применение спирто-бензольной смеси и четыреххлористого углерода при экстрагировании образца керна на растворители, не влияющие на поверхностные свойства породы, для предотвращения изменения смачиваемости породы;

— добавить требования к образцам керна, которые применяются при проведении фильтрационных экспериментов, для предотвращения разрушения образца под давлением и исключить из Стандарта требование применения фильтровальной бумаги и измельченной породы для заполнения пустот:

допустимое отклонение диаметра образца не более ± 1 мм,

торцевые поверхности образца должны быть плоскими, параллельными друг другу и перпендикулярными боковой поверхности. Допустимое отклонение от плоскости $\pm 0,05$ мм, параллельности $\pm 0,4$ мм, перпендикулярности ± 1 мм,

отсутствие сколов на торцах (не более 1,5 мм), каверн на боковой поверхности, видимых трещин;

— изменить требования к используемой воде при фильтрационных исследованиях, а именно: исключить возможность применения пластовой воды без ее предварительной подготовки по содержанию механических примесей, солей, эмульгированной нефти и др., что может заблокировать пути фильтрации образца керна и исказить конечный результат эксперимента;

— ограничить использование нефти из той же скважины, из которой извлечен керна материал, так как применение нефти из другой скважины, даже аналогичной по реологическим свойствам, может значительно повлиять на конечный результат фильтрационных экспериментов;

— текущая нормативно-техническая документация не учитывает возможностей и особенностей использования неконсолидированного или легкоразрушаемого керна, поэтому необходимо дополнить Стандарт единой методикой, которая должна регламентировать требования к насыпной модели, неконсолидированному керну, рабочим агентам (в том числе к пару), проведению эксперимента с насыпной моделью, методике сбора и обоснованию результатов;

— изменить требования к применяемому при фильтрационных экспериментах оборудованию:

исключить применение сплавов из олова, висмута и свинца для высокотемпературных элементов оборудования, так как данный сплав обладает низкой температурой плавления,

исключить применение меди при изготовлении элементов оборудования, непосредственно контактирующих с флюидами,

исключить из набора оборудования для фильтрационных экспериментов бюретки высокого давления и специальный жидкостный контейнер в связи с устареванием данного оборудования и внедрением автоматических регуляторов противодавления, которые позволяют вывести из системы измерения лишние единицы оборудования, тем самым снизить погрешность измерения, заменить их на мерные бюретки-сепараторы с ценой деления не более 0,2 мл,

рекомендовать применение ультразвуковых, оптических и других автоматических сепараторов, исключающих человеческий фактор при измерении.

Введение перечисленных изменений позволит более качественно проводить эксперименты на стадии воссоздания пластовых условий, с более высокой точностью оценивать коэффициент вытеснения нефти, снизить погрешности при проведении экспериментов. При этом совмещение фильтрационных экспериментов с томографическими исследованиями позволит осуществлять более четкий контроль эффективности разрабатываемых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] ОСТ 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента нефти водой в лабораторных условиях. Введ. 1987-01-01. М.: Миннефтепром, 1986.
- [2] *Ледовская Т.И., Мезенцев Д.Н., Тупицин Е.В., Шумская С.К., Шемелинин Ю.А.* Восстановление смачиваемости образцов керна при подготовке к фильтрационным исследованиям // Нефтяное хозяйство. 2012. № 11. С. 54–56.
- [3] *Хижняк Г.П., Амиров А.М., Мошева А.М., Мелехин С.В., Чижов Д.Б.* Влияние смачиваемости на коэффициент вытеснения нефти // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. № 6. С. 54–63.
- [4] ОСТ 39-180-85. Нефть. Метод определения смачиваемости углеводородосодержащих пород. Введ. 1985-07-01. М.: Миннефтепром, 1985.
- [5] ОСТ 39-227-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение фильтрационной характеристики и водовосприимчивости низкопроницаемых пород-коллекторов в пластовых условиях. Введ. 1990-07-01. М.: Миннефтепром, 1990.
- [6] ОСТ 39-228-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Оценка совместимости закачиваемой воды с пластовой водой и породой продуктивного пласта. Введ. 1990-07-01. М.: Миннефтепром, 1990.

- [7] ОСТ 39-229-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение совместимости закачиваемых и пластовых вод по кальциту и гипсу расчетным методом. Введ. 1990-07-01. М.: Миннефтепром, 1990.
- [8] ОСТ 39-230-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение размера частиц механических примесей. Введ. 1990-07-01. М.: Миннефтепром, 1990.
- [9] ОСТ 39-231-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение содержания механических примесей в речных и промысловых водах. Введ. 1990-07-01. М.: Миннефтепром, 1985.
- [10] ОСТ 39-232-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение размера частиц эмульгированной нефти. Введ. 1990-07-01. М.: Миннефтепром, 1990.
- [11] ОСТ 39-133-81. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение содержания нефти в промышленной сточной воде. Введ. 1982-07-01. М.: Миннефтепром, 1982.
- [12] ОСТ 39-233-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение содержания растворенного кислорода в нефтепромысловых сточных водах. Введ. 1990-07-01. М.: Миннефтепром, 1990.
- [13] ОСТ 39-234-89. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение содержания сероводорода. Введ. 1990-07-01. М.: Миннефтепром, 1985.
- [14] ОСТ 39-191-85. Вода для заводнения нефтяных пластов. Определение содержания железа в промышленной сточной воде. Введ. 1986-07-01. М.: Миннефтепром, 1986.
- [15] *Зубков М.Ю., Чуйко А.И.* Причины расхождения результатов экспериментальных исследований фазовых проницаемостей и коэффициентов вытеснения нефти водой для неокосских продуктивных отложений Аганского месторождения с промысловыми данными // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО (Шестая научно-практическая конференция): в 2 т. Т. II. 2003.
- [16] *Колпаков В.В., Зубков М.Ю., Коваленко Р.В.* Существующие ОСТы, регламентирующие проведение потоковых исследований и необходимость их модернизации // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО (Девятая научно-практическая конференция): в 3 т. Т. I. 2006.
- [17] *Амикс Д., Басс Д., Уайтинг Р.* Физика нефтяного пласта. М: Гостоптехиздат, 1962.
- [18] *Mott R., Cable A., Spearing M.* Measurement and simulation of inertial and high capillary number flow phenomena in gas-condensate relative permeability // SPE annual technical conference and exhibition. 2000. P. 13.
- [19] Лабораторно-измерительный комплекс для исследования нефтевытеснения: руководство по эксплуатации. Ред. 1.2. Vinci Technologies Inc. Nanterre, France. 2015.
- [20] Operating Manual. Auto Flood Reservoir Conditions Coreflooding System, AFS-300 // Core Lab Instruments, Tulsa. USA. 2014. С. 15–26.
- [21] Установка для исследования керна для высокотемпературных исследований в кислотоустойчивом исполнении ПИК-ОФП/ЭП-К-Т. АО «Геологика»: руководство по эксплуатации. Новосибирск, 2017.
- [22] *Жуковская Е.А., Лопушняк Ю.М.* Использование рентгеновской томографии при исследовании терригенных и карбонатных коллекторов // Нефтяное хозяйство. 2008. № 3. С. 24–31.
- [23] *Кривошеков С.Н., Кочнев А.А.* Определение емкостных свойств пород-коллекторов с применением рентгеновской томографии керна // Master's Journal. 2014. № 1 С. 120–128.

© Белошапка И.Е., Ганиев Д.И., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 16 мая 2018

Дата принятия к печати: 15 июля 2018

Для цитирования:

Белошапка И.Е., Ганиев Д.И. Применение фильтрационных исследований для изучения технологий разработки месторождений нетрадиционных коллекторов и трудноизвлекаемых запасов нефти // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования.* 2018. Т. 19. № 3. С. 343—357. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-343-357

Сведения об авторах:

Белошапка Иван Евгеньевич — аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт». *Область научных интересов:* повышение эффективности разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти, фильтрационные исследования. *Контактная информация:* e-mail: i.e.beloshapka@gmail.com

Ганиев Динис Ильдарович — аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Альметьевский государственный нефтяной институт». *Область научных интересов:* разработка нетрадиционных запасов нефти, фильтрационные исследования, томографические исследования. *Контактная информация:* e-mail: dinisganiev@gmail.com

Application of filtration tests for studying technologies for development of non-traditional reservoirs and tight oil reserves

I.E. Beloshapka, D.I. Ganiev

Almetyevsk State Oil Institute
2, Lenina str., Almetyevsk, 423452, Russian Federation

Abstract. Currently, main light hydrocarbon reserves are being depleted across the world, which is why more and more petroleum companies pay attention to the possibility of developing unconventional reservoirs and hard-to-recover reserves. It is obvious that at this development stage of technologies for oil field exploitation, cost-effective development of unconventional reservoirs is impossible, and therefore there is a need for new oil production methods. Herewith, accurate setting and conducting of laboratory experiments plays an important role, since the decisions taken based on the experimental results affect the technological and economic factors. Such studies include filtration tests for determining the oil displacement ratio from core in laboratory. When carrying out filtration tests, the important point is accurate formulation of the experiment, which is impossible without a well-developed methodology and specification. To date, the tests to determine the oil displacement ratio are regulated by IST-39-195-86, which was approved in 1986. In a detailed investigation of the document, it was established that most of the points in the document need to be changed and refined in connection with the improvement of equipment and methods for preparing the core material in order to reduce errors at various stages of the experiment and to estimate the displacement ratio more accurately in determining the effectiveness of the technologies being developed.

Key words: filtration, core material, displacement ratio, industry standard, extraction, permeability

REFERENCES

- [1] OST 39-195-86. Neft'. Metod opredeleniya koeffitsienta nefti vodoi v laboratornykh usloviyakh. Vzamen OST 39-070-78; vved. 1987-01-01 [IST 39-195-86. Oil. Method for determining the oil ratio in water in laboratory. In exchange for IST 39-070-78; Effective 1987-01-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1986. 2–16. (In Russ.)
- [2] Ledovskaya T.I., Mezentsev D.N., Tupitsin E.V., Shumskaya S.K., Shchemelinin Y.A. Vosstanovlenie smachivaemosti obraztsov kerna pri podgotovke k fil'tratsionnym issledovaniyam [Recovering the wettability of core samples in preparation for filtration tests]. *Oil Industry*. 2012. No. 11. 54–56. (In Russ.)
- [3] Khizhnyak G.P., Amirov A.M., Mosheva A.M., Melekhin S.V., Chizhov D.B. Influence of wettability on oil displacement efficiency. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*. 2012. No. 6. 54–63. (In Russ.)
- [4] OST 39-180-85. Neft'. Metod opredeleniya smachivaemosti uglevodorodosoderzhashchikh porod. Vved. 1985-07-01 [IST 39-180-85. Oil. Method for determination of wettability of hydrocarbonaceous rocks. Effective 1985-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1985. 2–10. (In Russ.)
- [5] OST 39-227-89. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Opredelenie fil'tratsionnoi kharakteristiki i vodovospriimchivosti nizkopronitsaemykh porod-kollektorov v plastovykh usloviyakh. Vved. 1990-07-01 [IST 39-227-89. Water for flooding oil reservoirs. Determination of filtration characteristic and water sensibility of low-permeable reservoir rocks in in-situ conditions. Effective 1990-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1990. 2–10. (In Russ.)
- [6] OST 39-228-89. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Otsenka sovместimosti zakachivaemoi vody s plastovoi vodoi i porodoi produktivnogo plasta. Vved. 1990-07-01 [IST 39-228-89. Water for flooding oil reservoirs. Assessment of compatibility of injected water with stratal water and reservoir rock. Effective 1990-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1990. 2–10. (In Russ.)
- [7] OST 39-229-89. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Opredelenie sovместimosti zakachivaemykh i plastovykh vod po kal'tsиту i gipsu raschetnym metodom. Vved. 1990-07-01 [IST 39-229-89. Water for flooding oil reservoirs. Determination of compatibility of injected and stratal water by calcite and gypsum calculation method. Effective 1990-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1990. 2–8. (In Russ.)
- [8] OST 39-230-89. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Opredelenie razmera chastits mekhanicheskikh primesei. Vved. 1990-07-01 [IST 39-230-89. Water for flooding oil reservoirs. Determination of particle size of mechanical impurities. Effective. 1990-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1990. 2–9. (In Russ.)
- [9] OST 39-231-89. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Opredelenie sodержaniya mekhanicheskikh primesei v rechnykh i promyslovykh vodakh. Vved. 1990-07-01 [IST 39-231-89. Water for flooding oil reservoirs. Determination of content of mechanical impurities in river and commercial waters. Effective 1990-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1985. 2–10. (In Russ.)
- [10] OST 39-232-89. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Opredelenie razmera chastits emul'girovannoi nefti. Vved. 1990-07-01 [IST 39-232-89. Water for flooding oil reservoirs. Determination of particle size of emulsified oil. Effective 1990-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1990. 2–10. (In Russ.)
- [11] OST 39-133-81. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Opredelenie sodержaniya nefti v promyslovoi stochnoi vode. Vved. 1982-07-01 [IST 39-133-81. Water for flooding oil reservoirs. Determination of oil content in commercial wastewater. Effective 1982-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1982. 2–7. (In Russ.)
- [12] OST 39-233-89. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Opredelenie sodержaniya rastvorenного kisloroda v neftepromyslovykh stochnykh vodakh. Vved. 1990-07-01 [IST 39-233-89. Water for flooding oil reservoirs. Determination of dissolved oxygen content in oilfield wastewater. Effective. 1990-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1990. 2–10. (In Russ.)

- [13] OST 39-234-89. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Opredelenie sodержaniya serovodoroda. Vved. 1990-07-01 [IST 39-234-89. Water for flooding oil reservoirs. Determination of hydrogen sulphide content. Effective 1990-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1985. 2–15. (In Russ.)
- [14] OST 39-191-85. Voda dlya zavodneniya neftyanykh plastov. Opredelenie sodержaniya zheleza v promyslovoi stochnoi vode. Vved. 1986-07-01 [IST 39-191-85. Water for flooding oil reservoirs. Determination of iron content in commercial wastewater. Effective. 1986-07-01]. Moscow: Minnefteprom Publ., 1986. 2–8. (In Russ.)
- [15] Zubkov M.Y., Chuiko A.I. Prichiny raskhozheniya rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy fazovykh pronitsaemosti i koeffitsientov vytesneniya nefli vodoi dlya neokomskikh produktivnykh otlozheniy Aganskogo mestorozhdeniya s promyslovymi dannymi [The reasons for discrepancy between the results of experimental studies of phase permeabilities and oil displacement ratios for Neocomian productive deposits of the Agan field with field data]. Sbornik «Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO» (Shestaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya) v dvukh tomakh [Collection of “Ways of realizing the oil and gas potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous District” (Sixth Scientific and Practical Conference) in two volumes]. 2003. Vol. II. 247–256. (In Russ.)
- [16] Kolpakov V.V., Zubkov M.Y., Kovalenko R.V. Sushchestvuyushchie OSTy, reglamentiruyushchie provedenie potokovykh issledovaniy i neobkhodimost' ikh modernizatsii [Existing ISTs, regulating the conduct of streaming tests and the need for their modernization]. Sbornik «Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala KhMAO» (Devyataya nauchno-prakticheskaya konferentsiya) v trekh tomakh [Collection of “Ways of realizing the oil and gas potential of the Khanty-Mansiysk Autonomous District” (Ninth Scientific and Practical Conference) in three volumes]. Vol. I. 2006. 460–465. (In Russ.)
- [17] Amiks D., Bass D., Whiting R. Fizika neftyanogo plasta [Physics of oil reservoir]. Moscow: Gostoptekhizdat Publ., 1962. 572 p. (In Russ.)
- [18] Mott R., Cable A., Spearing M. Measurement and simulation of inertial and high capillary number flow in gas-condensate relative permeability, SPE annual technical conference and exhibition. 2000. P. 13.
- [19] Instruction manual. Laboratory-measuring complex for oil displacement research. Revision 1.2, Vinci Technologies Inc. Nanterre, France. 2015. 8–34. (In Russ.)
- [20] Operating Manual. Auto Flood Reservoir Conditions Coreflooding System, AFS-300, Core Lab Instruments, Tulsa. USA. 2014. 15–26.
- [21] Instruction manual. Core testing unit for high-temperature studies in acid-proof design PIK-OFP/EP-K-T. Geologika JSC. Novosibirsk, 2017. 7–14. (In Russ.)
- [22] Zhukovskaya E.A., Lopushnyak Y.M. Ispol'zovanie rentgenovskoi tomografii pri issledovanii terrigennykh i karbonatnykh kollektorov [The use of X-ray tomography in the study of terrigenous and carbonate reservoirs]. *Oil Industry*. 2008. No. 3. 24–31. (In Russ.)
- [23] Krivoshchekov S.N., Kochnev A.A. Determination of reservoir properties of reservoir rocks using X-ray imaging core. *Master's Journal*. 2014. No. 1. 120–128. (In Russ.)

Article history:

Received: May 16, 2018

Accepted: July 15, 2018

For citation:

Beloshapka I.E., Ganiev D.I. (2018). Application of filtration tests for studying technologies for development of non-traditional reservoirs and tight oil reserves. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19 (3), 343-357. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-343-357

Bio Note:

Ivan E. Beloshapka — Post-graduate student of the Department of Development and Exploitation of Oil and Gas Fields, Almeteyevsk State Oil Institute. *Research interests:* Increasing efficiency of developing deposits with tight oil reserves, filtration tests. *Contact information:* e-mail: i.e.beloshapka@gmail.com

Dinis I. Ganiev — Post-graduate student of the Department of Development and Exploitation of Oil and Gas Fields, Almeteyevsk State Oil Institute. *Research interests:* Unconventional reserves oil development, filtration tests, tomographic studies. *Contact information:* e-mail: dinisganiev@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-358-364

УДК 550.83+550.43+551.86.

Стратиграфия района нефтяного месторождения Efi-Field прибрежной зоны дельты р. Нигер

В.Ю. Абрамов, М.Б. Оффiong

Российский университет дружбы народов (РУДН)

Российская Федерация, 119017, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Дельта р. Нигер входит в число самых богатых мировых углеводородных провинций в мире. Геологическое строение дельты р. Нигер сложено из пород мезозойского и кайнозойского возраста. Геологическая структура современной дельты р. Нигер имеет бассейновую структуру, определяющуюся внутренней экстенциональной зоной литрических разломов под внешней частью шельфа, поступательными зонами диапиров и сланцевых гребней под верхней частью склона, а также более низкой компрессионной зоной. Дельта состоит из трех широких формаций — Формации Benin (Олигоцен), Формации Agbada (Эоцен) и Формации Akata (Палеоцен). Месторождение Efi-Field сложено породами кайнозойского возраста. Геологический разрез отложений начинается с палеогенового (P_1-P_3), неогенового (N_2) и четвертичного возрастов. Кайнозойские отложения представлены породами палеогенового, палеоген-четвертичного и четвертичного периода. Распространенность по территории весьма неравномерная. К осевой части дельты р. Нигер в основном тяготеют четвертичные отложения, иногда с выпадением некоторых стратиграфических подразделений кайнозоя. Осадки формировались в условиях кайнозойской локальной регрессии океана, вследствие чего основание разреза представлено морскими геолого-генетическими типами осадков, а средняя и верхняя — части переходными прибрежно-морскими типами осадков.

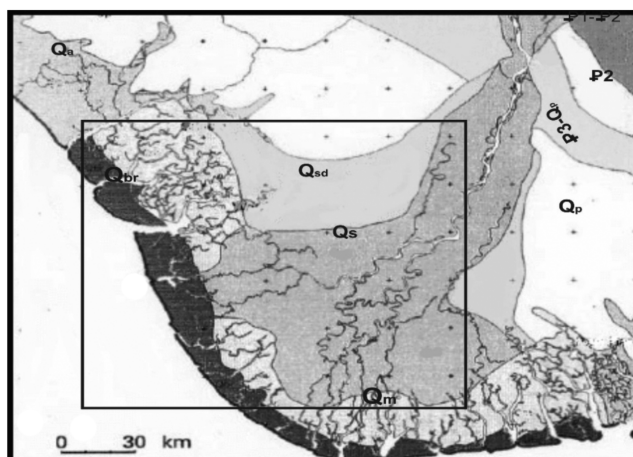
Ключевые слова: дельта, геология, пород, возраста, отложение

Введение

Дельта р. Нигер входит в число самых богатых мировых углеводородных провинций в мире. Это самая большая водно-болотная местность в Африке, расположенная на континентальных окраинах Гвинейского залива между 3° и 6° с. ш. и 5° и 8° в. д. На сегодняшний день в Нигерии на долю бассейна дельты р. Нигер приходится более 80% добычи углеводородов [1].

Общая геологическая структура дельта р. Нигер

Геологическое строение дельты р. Нигер сложено из пород мезозойского и кайнозойского возраста (рис. 1). Отложения верхнего мезозоя представлены породами мелового возраста, залегающими с угловым и стратиграфическим несогласием на породах архея. Геологический разрез отложений начинается с нижнего мела (K_1), широко распространены осадки верхнего мела (K_2), палеогенового (P_1-P_3), неогенового (N_2) и четвертичного периодов.



Условные обозначения

Q _a	1	Q _{br}	4	P3-Q _p	7
Q _s	2	Q _{sd}	5	P2	8
Q _m	3	Q _p	6	P1-P2	9

Рис. 1. Геологическая карта месторождения Efi-Field, дельта р. Нигер, Нигерия (Reijers 2011):

1 — аллювий; 2 — глинистые пески, глина; 3 — пески, глина; 4 — пески, гальки;

5 — пески, глины и мангровое болота; 6 — пески, мелькозернистые глины;

7 — песчаник, глина; 8 — пески, лигниты; 9 — глинистые сланцы, песчаники

[**Fig. 1.** Geologic map of Efi-Field, Niger Delta, Nigeria (Reijers 2011):

1 — alluvium; 2 — Clay sand, clay; 3 — Sand, clay; 4 — Sand, pebbles; 5 — Sand, clay, Mangrove swamps;

6 — Sand, fine-grain clay; 7 — Sandstones, clay, shale; 8 — Sands, lignite; 9 — Clay, shale, sandstone]

Геологическая структура современной дельты р. Нигер имеет бассейновую структуру, определяющуюся внутренней экстенсиональной зоной литрических разломов под внешней частью шельфа, поступательными зонами диапиров и сланцевых гребней под верхней частью склона, а также более низкой компрессионной зоной. Лито-стратиграфические единицы определены в недрах дельты р. Нигер в возрасте, отражающем общую регрессию условий осадконакопления в пределах дельты. Дельта состоит из трех широких формаций: I. Формация Venin (Олигоцен); II. Формация Agbada (Эоцен); III. Формация Akata (Палеоцен).

Эти образования представляют собой слои осадконакопления, отличающиеся в основном их песчано-глинистыми соотношениями.

Формация Akata имеет морское происхождение и состоит из сланцев, глин и илов. Формация была сформирована в низинах, когда наземные органические вещества глины переместились в глубоководные области, характеризующиеся низкими энергетическими условиями и дефицитом кислорода. Толщина формации Akata составляет приблизительно 7000 м и характеризуется как нефтематеринская порода.

Формация Agbada состоит из последовательных прослоек песчаников и сланцев. Обломочный слой был накоплен в дельта-фронте, верхнем слое дельты и речной среде. Практически все скопления углеводородов в дельте р. Нигер содержатся в песчаниках формации Agbada. Сланцевые формирования образуют

непроницаемые барьеры на пути дальнейшей миграции углеводородов [2; 4]. Формирование Agbada имеет толщину около 3500 м (11 500 футов), представляющую фактическую дельтовую часть последовательности. Также в образовании Agbada присутствуют глинистые минералы с небольшим количеством кварца, полевого шпата, карбонатов, пирита и других песчаников формации, а также слабо сцементированные крупнозернистые и мелкозернистые кварцы.

Формация Benin состоит из континентальных аллювиальных отложений и верхних равнинных песков побережья с толщиной около 2000 м².

Литологические-стратиграфические подразделения месторождения Efi-Field

Геологическое строение Efi-Field сложено породами кайнозойского возраста [3]. Геологический разрез отложений начинается с палеогенового ($P_1—P_3$), неогенового (N_2) и четвертичного возрастов (рис. 2).

Кайнозойская эратема

Кайнозойские отложения представлены породами палеогенового, палеоген-четвертичного и четвертичного периода. Распространенность по территории весьма неравномерная. К осевой части дельты р. Нигер в основном тяготеют четвертичные отложения, иногда с выпадением некоторых стратиграфических подразделений кайнозоя.

Палеогеновая система. Осадки формировались в условиях кайнозойской локальной регрессии океана, вследствие чего основание разреза представлено морскими геолого-генетическими типами осадков, а средняя и верхняя части переходными прибрежно-морскими типами осадков.

Палеоцен-нижний эоцен ($P_1—P_2$). Толща представлена неритмичным напластованием глинистых сланцев темно-серого цвета, тонкоплитчатых песчаников от серого до светло-серого цвета с извесковисто-глинистым цементом на фосфоритоносные массивные светло-серые известняки и мелоподобные мергели светло-серого цвета. Таким образом, породы формировались в условиях мелководного моря с постепенной общей регрессией, в рамках которой отмечаются отдельные трансгрессивные периоды, носящие локальный характер. Суммарная мощность — до 850 м.

Средний-верхний эоцен (P_2). Отложения данного возраста представлены мощной толщей разнозернистых песков серого, белого, желтого цветов и их оттенков. Представляется, что накопление песков происходило в разных условиях, так как наряду с типичными несортированными прибрежно-морскими песками отмечаются аллювиальные и дюнные пески, имеющие в целом более выдержанный granulометрический состав.

Присутствие в толще пластов и линз лигнитов, т.е. бурых углей, характерных отложений заболоченных равнин и лиманов подчеркивает трансгрессивно-регрессивный характер осадконакопления на фоне общей постепенной регрессии океана. Мощность — до 1250 м.

ЭРА ТЕМА ERATHEME	СИСТЕМА SYSTEM	ОТДЕЛ DIVISION	ПОДОТДЕЛ SUBDIVISION	ИНДЕКС INDEX	формация formation	геологическая колонка geologic column	мощность thickness	характеристика пород characteristics of rocks				
Кайнозойская CENOZOIC	ЧЕТВЕРТИЧНАЯ QUATERNARY	ГОЛОЦЕН HOLOCENE		Q _{IV}	Бенин Benin		max 2100 m	Аллювиальные отложения. Суглинки с линзами песков серых, глины Alluvial deposits. Loam with sand lenses gray. Clays				
				Q _{III}				Отложения дельтовых равнин. Глинистые пески, глины Sediments of the deltaic plains. Clay Sands, clays				
				Q _{III}				Отложения дельтовых долин. Пески серые, Sediments of the deltaic plains. The Sands are gray,				
				Q _{II}				Отложения дельтовых равнин. Пески светло-серые с линзами глин Sediments of the deltaic plains. The Sands fine-grained with clay lenses				
				Q _I				Отложения дельтовых равнин. Пески иловые с линзами глин светло-серых Sediments of the deltaic plains. Silt Sands with lenses of clays light grey				
				Q _I				Отложения дельтовых равнин. Пески мелкозернистые Sediments of the deltaic plains. Fine-grained Sands				
	НЕОГЕНОВАЯ NEOGENE	ОЛИГОЦЕН OLIGOCENE	СРЕДНИЙ-ВЕРХНИЙ MIDDLE-UPPER		Q+P	Агбада Agbada		>3000 m	Донные отложения и отложения береговых линий (прибрежно-морские отложения). Песчаники с линзами глин. Bottom sediments and shoreline deposits (coastal-marine sediments). Sandstones with lenses of clay.			
					P ₃				Пески, лигниты, НЕФТЕНОСНЫЕ пески, характерные для заболоченных равнин Sands, lignites, OIL Sands typical of wetlands			
									P ₂ -P ₁	Аката Akata	600 - 6000 m	Глинистые сланцы, песчаники. Карбонатно-терригенная формация (известняки, мергели) Clays shale, sandstones. Carbonate-terrigenous formation (limestone, mart)

Рис. 2. Стратиграфическая колонка месторождения Efi-Field, дельта р. Нигер, Нигерия
[Fig. 2. Stratigraphic column of Efi-Field, NigerDelta, Nigeria]

Олигоцен-плейстоцен (P_3-Q_p). Распространен в основном в центральной и юго-западной части исследуемой территории. На юго-западе территории представлены дюнные отложения эолового генезиса и отложения береговой линии морского происхождения, т.е. данные осадки сформировались в прибрежно-морских условиях. Для центральной части характерны песчаники желтого, желто-оранжевого цвета, слабо сцементированные железисто-глинистым цементом с линзами темно-серых тонкоплитчатых глин.

Не исключено, что формирование песчаников носит эпигенетическое происхождение за счет процессов оглеения. Мощность достигает 1020 м.

Четвертичная система. Представлена плейстоценом и голоценом.

Верхний плейстоцен-нижний голоцен (Q_a-Q_p). Эти периоды представлены типичными отложениями дельтовых равнин в виде мелкозернистых песков желтого цвета. Мощность колеблется от 35 до 40 м.

Голоцен Q_p . Отложения голоценового периода самые распространенные, выходящие на поверхность. Осадки представлены типичными отложениями дельтовых равнин, вследствие чего наблюдаются разнообразные геолого-генетические типы. Такое разнообразие генетических типов объясняется наличием нескольких разных систем взаимодействия и переноса обломочного материала: река; река— море; замкнутые и периодически замкнутые водные бассейны (озера, болота, лиманы, старицы). Взаимоотношения между отдельными типами осадков носят сложный, иногда неясный характер, часто с постепенными переходами от одного к другому типу осадков.

Нижний горизонт (Q_{sd}). Прибрежно-морские осадки в виде реликтов береговых валов, сложенных иловыми песками с маломощными линзами светло-серых глин. Мощность до 45 м.

Нижний горизонт (Q_{br}). Отложения дельтовых равнин. Представлены темными суглинками с линзами серого песка, битуминозными жирными глинами темного цвета. Данные отложения депрессий равнин: лиманов, прибрежно-морских и мангровых болот. Мощность до 30 м.

Нижний горизонт (Q_m). Отложения дельтовых равнин. Результатом взаимодействия системы река— море является образование мангровых болот. Они сложены напластованием светло-серых глинистых песков и темно-серых глин. Мощность до 35 м.

Верхний горизонт (Q_s). Отложения дельтовых равнин, осадки которых сформированы в пресноводных озерах переменного сезонного дебета. Представлены аллювием в виде мелкозернистых песков светлых оттенков и глинами серого цвета. Сложены серые мелкозернистые пески с линзами серых глин. Мощность до 40 м.

Речные отложения (Q_a). Аллювий высокой и низкой пойм. Представлен суглинками темно-серого цвета с линзами серых песков и темно-серых глин. Осадкакопление носит сезонный характер.

Заклучение

Наибольший интерес для изучения в настоящее время представляют отложенные палеоцена и нижнего и среднего эоцена, сформировавшиеся в условиях чередования трансгрессий и регрессий. Они представлены карбонатными породами и песчаниками с органическими остатками. В этих породах также содержатся пласты лигнитов (бурый уголь), а на прилегающих к Efi-Field площадях и в соседних районах найдены залежи нефти. Таким образом, именно эти пласты обладают наибольшими перспективами на обнаружение месторождения нефтеносных песков на изучаемой площади.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Doust, H., and E. Omatsola* (1990). Niger Delta in divergent/passive margin basins, in J.D. Edwards and P.A. Santogrossi, eds., AAPG Memoir 48. P. 201—238.
- [2] *Avbovbo, A.A.* (1978). Tertiary lithostratigraphy of the Niger Delta: AAPG Bulletin. V. 62. P. 295—300.
- [3] *Reijers, T.R.A.* (2011). Stratigraphy and sedimentology of the Niger Delta. *Geologos*. 17(3). 133—162.
- [4] *Short K.C., Stauble J.* (1967). Outline geology of the Niger Delta. AAPG Bull 5: 761—779.

© Абрамов В.Ю., Оффiong М.Б., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 18 декабря 2017

Дата принятия к печати: 11 марта 2018

Для цитирования:

Абрамов В.Ю., Оффiong М.Б. Стратиграфия района нефтяного месторождения “Efi-field” прибрежной зоны дельты р. Нигер // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 358—364. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-358-364

Сведения об авторах:

Абрамов Владимир Юрьевич — кандидат геолого-минералогических наук, доцент департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* геология и геофизика месторождений полезных ископаемых. *Контактная информация:* e-mail: geophy-rudn@mail.ru

Оффiong Майкл Бассей — аспирант департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* геология и геофизика месторождений нефти и газа. *Контактная информация:* e-mail: effiong1985@gmail.com

Stratigraphy of “Efi-Field” oil deposit of Niger delta on-shore region

V. Yu. Abramov, M.B. Offiong

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

Abstract. The Niger Delta is one of the richest hydrocarbon provinces in the world. The geological structure of Niger Delta is composed of Mesozoic and Cenozoic rocks. Modern Niger Delta has distinctive basin-like geological structure that is defined by inner extensional zone of listric growth faults beneath the outer shelf, translational zone of diapirs and shale ridges beneath the upper slope, and a lower compressional zone of toe thrust structures. The delta comprises of three broad formations, namely: the Benin Formation (Oligocene to recent), Agbada Formation (Eocene to recent) and the Akata Formation (Paleocene to recent). The “Efi-Field” deposit is composed of rocks of the Cenozoic age. The geological section of the field starts from Paleogene (P_1 – P_3), Neogene (N_2) and Quaternary periods. The Cenozoic deposits are represented by rocks of the Paleogene, Paleogene-Quaternary and Quaternary periods. The prevalence along the territory is very uneven. Close to the axial part of the Niger Delta, Quaternary sediments predominate, sometimes with sedimentation of some stratigraphic subdivisions of the Cenozoic period. Sedimentation was formed under conditions of Cenozoic local regression of the ocean, as a result of which the base of the section is represented by marine geological-genetic types of sediments, and the middle and upper parts by transitional coastal-marine types of sedimentation.

Key words: delta, geology, rocks, age, deposition

REFERENCES

- [1] Doust, H., and E. Omatsola (1990). Niger Delta in divergent/passive margin basins, in J.D. Edwards and P.A. Santogrossi, eds., AAPG Memoir 48. P. 201—238.
- [2] Avbovbo, A.A. (1978). Tertiary lithostratigraphy of the Niger Delta: AAPG Bulletin. V. 62. P. 295—300.
- [3] Reijers, T.R.A. (2011). Stratigraphy and sedimentology of the Niger Delta. *Geologos*. 17(3). 133—162.
- [4] Short K.C., Stauble J. (1967). Outline geology of the Niger Delta. AAPG Bull 5: 761—779.

Article history:

Received: December 18, 2017

Accepted: March 11, 2018

For citation:

Abramov V.Yu., Offiong M.B. (2018). Stratigraphy of “Efi-field” oil deposit of Niger delta on-shore region. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(3), 358—364. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-358-364

Bio Note:

Vladimir Yu. Abramov — Candidate of Geological Sciences, associate Professor of the Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* geology and geophysics of mineral deposits. *Contact information:* e-mail: geophy-rudn@mail.ru

Mikel Bassey Offiong — postgraduate student of geology of the Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* geology and geophysics of oil and gas deposit. *Contact information:* e-mail: effiong1985@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-365-377

УДК 504.55.054: 622(470.6)

Направления совершенствования механохимических процессов при утилизации хвостов обогащения руд

В.И. Голик, В.Б. Келехсаев, Ю.А. Майстров, А.С. Олисаев

Северо-Кавказский государственный технологический университет
Российская Федерация, 362021, Владикавказ, ул. Николаева, 44

Рассмотрена проблема безотходного извлечения металлов из хвостов первичной переработки руд. Представлена обобщенная концепция развития механохимической технологии извлечения металлов путем выщелачивания в дезинтеграторе. Рассматривается теория и практика механохимического извлечения металлов из руд, и дается оценка существующего положения.

В статье освещены проблемы повышения скорости и полноты извлечения металлов, оставшихся после первичной переработки методами традиционного обогащения, приводится аргументация и научное описание новых методов интенсификации выщелачивания металлов в дезинтеграторе. Особое внимание уделено эффективности комплексования способов воздействия на минерал с целью повышения извлечения, что позволит снизить эксплуатационные затраты.

Область применения прорывной технологии безотходного извлечения металлов из омертвленного убогого сырья может быть повышена путем использования новых и перспективных технологий, основанных на увеличении энергетики процессов. Экспериментально подтвержден феномен безотходного извлечения суммы металлов в коллективный концентрат путем многократной активации в дезинтеграторе.

Необходимо осваивать новую технологию с получением экономических, экологических и стратегических преимуществ. Открывается кластер новых проблем, например, селективное извлечение металлов из коллективного раствора, оптимизация стойкости рабочего органа дезинтегратора, утилизацию маточных растворов и т.п.

Ключевые слова: металл, руда, механохимия, извлечение, выщелачивание, дезинтегратор, воздействие, эксперимент, активация

Введение

Хорошо освоенные в различных отраслях промышленности дезинтеграторы позволяют обрабатывать материалы крупностью до 2,5 мм со скоростью удара до 250 м/с. В зависимости от свойств материала и режима обработки при их использовании получают тонину порошков от грубого порошка (95% менее 500 мкм) до тонкого порошка (95% менее 20 мкм).

Если функции измельчения фаз и перемешивания при приготовлении смесей и суспензий используются довольно широко, то феномен механической активации веществ при интенсивных режимах обработки используется сравнительно редко.

Основные области применения дезинтегратора — лабораторные и исследовательские работы, тестирование и подготовка к анализу различных веществ. В середине прошлого столетия Й. Хинт теоретически обосновал и экспериментально доказал феномен изменения состояния вещества в процессе активации большой механической энергией, однако только сейчас он получает осмысление.

Феномен активации при обработке в дезинтеграторной установке (ДУ) наблюдается во многих отраслях, что подтверждает корректность метода:

- фосфоритную муку растения усваивают в несколько раз лучше, чем муку, измельченную в мельнице;
- портландцемент из клинкера обеспечивает одинаковую прочность через 16 дней вместо 28 дней;
- производство искусственного камня из силикальцита обходится в 2 раза дешевле при уменьшении расхода энергии на 50%;
- активация стекольной смеси и шихты для производства огнеупоров на 20 °С понижает температуру плавления или обжига, в 2 раза увеличивает скорость процесса;
- обработка железной руды на 100 °С снижает температуру восстановления металла и на 20% уменьшает затраты времени;
- обработка вольфрамовых концентратов на 10% увеличивает степень извлечения металла и на 15—20% скорость гидротермической обработки;
- обработка медных и железорудных концентратов совместно с вяжущим до 35% повышает прочность окатышей;
- активация воды увеличивает рост растений на 30—40%, животных на 20%, рыб на 45—100%, повышает стойкость растений к экстремальным условиям на 20%, а добавка активированной воды в количестве 10 мл на 1 кг веса животных на 20% увеличивает привес и т.п.

В горной практике промышленное использование дезинтегратора осуществлено в 1980-х гг. на месторождении «Шокпак» (Северный Казахстан) МАЭП СССР в цепи закладочного комплекса. Установка ДУ-65 была оборудована четырёх- и трехрядными роторами с защитным самофутерующимся слоем и двигателями мощностью от 200 до 250 кВт. Установка располагалась на трех уровнях с площадью основания 5—7 м [1].

Сырьем служили гранулированные кислые хвосты Карагандинского металлургического завода. По вяжущей способности эквивалентом 1 кг стандартного цемента М-400 являлось 4 кг активированных хвостов.

В условиях 10-летней эксплуатации определено, что активация в ДУ обеспечивала при равных условиях приращение прочности до 30% больше, чем обработка в шаровой мельнице. Выход до после ДУ 55% активного класса с доработкой в вибромельнице до 70% активной фракции позволил свести расход промышленного цемента до 30 кг/м³.

Солидный срок использования с закладкой около 100 000 м³ пустот ежегодно позволяет положительно оценить результаты промышленного эксперимента и рекомендовать его как реальную возможность получения многопланового эколого-экономического эффекта.

Работами ученых Северо-Кавказской школы экспериментально доказана перспективность комбинирования технологий механической активации в дезинтеграторах и химического выщелачивания [2].

Процесс комбинированной механохимической активации металлосодержащего сырья заключается в том, что в рабочий орган дезинтегратора вместе с сырьем подается выщелачивающий реагент, а извлечение металлов в раствор происходит одновременно с разрушением кристаллов при запрессовке раствора в образующиеся микротрещины.

Цель работы

Для доказательства эффективности предлагаемой технологии используется комплексный метод исследований, включающий критический анализ существующих представлений и многолетний эксперимент по единой комплексной программе. На основе полученных результатов разрабатываются новые способы интенсификации процесса, защищенные на уровне патентов.

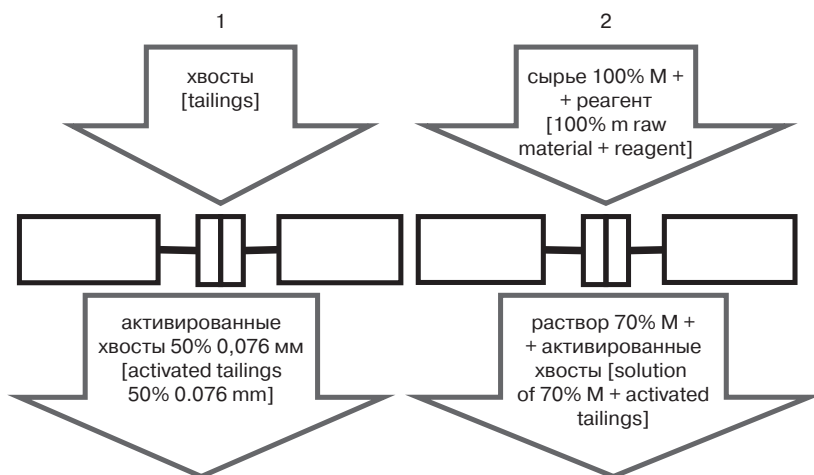


Рис. 1. Аспекты использования дезинтеграторов: 1 — для улучшения качества в составе бетонов; 2 — для извлечения металлов и улучшения качества в составе бетонов
[Fig. 1. Aspects of disintegrator use: 1 — for improving quality when used in concrete; 2 — for extraction of metals and improving quality when used in concrete]

Экспериментальное исследование с целью определения количественных параметров перевода металлических компонентов в раствор при комбинировании базового варианта агитационного выщелачивания и нового варианта выщелачивания в дезинтеграторе осуществлено на хвостах обогащения цветных и черных металлов и углей с использованием дезинтегратора ДУ-11, изготовленного в Центре прикладной механохимии «Гефест». Продолжительность эксперимента четыре года. Исходное содержание цинка и свинца в хвостах обогащения по 0,05%.

Исследованию подлежат два направления использования дезинтеграторов (рис. 1):

1) активация твердых полезных ископаемых для улучшения качества изделий из них;

2) активация твердых металлосодержащих полезных ископаемых и хвостов первичной переработки для улучшения качества изделий из них и извлечения металлов.

Полученные результаты

При сравнении вариантов механохимического извлечения металлов получены результаты:

— выщелачивание в дезинтеграторе с последующим выщелачиванием вне его по сравнению с простым агитационным выщелачиванием увеличивает извлечение:

из хвостов обогащения — по свинцу — в 1,4 раза, по цинку — в 1,2 раза, из забалансовой руды — по свинцу — в 1,7 раза, по цинку — в 2,1 раза;

— выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с вариантом отдельной активации в дезинтеграторе и выщелачивания увеличивает извлечение примерно на такую же величину, но резко различается временем достижения этого результата.

Если при агитационном выщелачивании коэффициент извлечения металлов оценивается величиной 0,40, то извлечение в дезинтеграторе обеспечивает коэффициент:

— из хвостов обогащения — по свинцу — 0,56, по цинку — 0,48;
— из забалансовой руды — по свинцу — 0,68, по цинку — 0,82;

При исходном содержании свинца и цинка в хвостах 0,05% во вторичных хвостах будет содержаться не более 0,025% металлов, что позволяет использовать их для производства некоторых видов товарной продукции строительного назначения. Некондиционное сырье утилизируется полностью, при этом устраняются негативные последствия его хранения.

В раствор выщелачивания извлекаются все металлы, содержащиеся в исходной минеральной массе. При решении вопросов извлечения металлов из раствора экономическая эффективность процесса увеличивается многократно, что особенно важно для переработки хвостов комплексных ценных руд.

Экспериментально определено, что при переработке хвостов обогащения минералов различных типов — полиметаллов Садона, угля российского Донбасса и железистых кварцитов КМА в раствор извлекается от 50 до 80% ранее теряемых в хвостах металлов. При необходимости путем увеличения циклов переработки со снижением остаточное содержание понижается до норм ПДК.

Установленные закономерности механохимического выщелачивания весьма различающихся типов убогого сырья в дезинтеграторах включают в себя:

— процесс извлечения металлов управляется путем изменения параметров переработки;

— выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с агитационным выщелачиванием вне его обеспечивает равное извлечение металлов на два порядка быстрее;

— после извлечения металлов до уровня санитарных требований вторичные хвосты пригодны для изготовления товарной продукции без ограничения.

Важные аспекты технологии — увеличение прочности смеси за счет увеличения активных фракций крупностью до 0,076 мм до 50% и повышение однородности и подвижности смесей [3].

В мировой горной практике преобладает мнение, что действенной мерой снижения глобальной опасности хвостов переработки для окружающей среды может быть полная утилизация химически опасных хвостов обогащения металлических руд [4]. В настоящее время этого можно достичь только путем перевода металлических компонентов в раствор выщелачиванием. Развитие этой технологии сдерживается продолжительностью процесса и трудностью контроля полноты извлечения.

Новая технология позволяет путем увеличения циклов переработки снижать содержание металла в хвостах до допустимого уровня. По сравнению с альтернативными вариантами выщелачивания она обеспечивает одинаковое извлечение металлов на два порядка быстрее. Такие возможности недоступны для технологий традиционного обогащения.

Естественно, что новая технология нуждается в решении кластера технологических проблем, например, повышении стойкости рабочего органа дезинтегратора, селективизации извлечения металлов и солей из комплексного раствора, нейтрализации маточников и т.п. Решение этих вопросов получит естественное ускорение по мере увеличения области использования механохимической технологии.

Совершенствование процессов механохимической активации или выщелачивания в дезинтеграторе нуждается в усилении слагающих его механохимических компонент использование известных в смежных отраслях процессов (таблица).

Таблица

Направления совершенствования процессов выщелачивания металлов
[Table. Directions for improvement of metal leaching]

Воздействие [Impact]	Цель совершенствования [Purpose of improvement]	Способ осуществления [Method of implementation]
Механическое: вибрация в процессе выщелачивания [Mechanical: vibration in the process of leaching]	Увеличение поверхности реагирования и профилактика слипания частиц [Increasing reacting surface and prevention of clumping of particles]	Повышение импульсов вибрации путем сотрясения рабочего органа дезинтегратора [Increasing vibration impact by shaking the working body of disintegrator]
Химическое: обработка на стадии подготовки [Chemical: treatment during preparation]	Ускорение процесса извлечения металлов в раствор в дезинтеграторе [Acceleration of the process of extracting metal into solution in disintegrator]	Предварительная обработка раствором реагентов, улучшающих условия выщелачивания в дезинтеграторе [Pretreatment with solution of reagents that improve leaching conditions in disintegrator]
Комбинированное: извлечение упорных компонентов после выщелачивания в дезинтеграторе [Combined: extraction of resistant components after eaching in disintegrator]	Увеличение полноты использования сырья путем дополнительного выщелачивания упорных металлов [Increasing fullness of raw materials utilization by additional leaching of resistant metals]	Обработка раствором реагентов после выщелачивания [Processing with reagent solution after leaching]

Механическое воздействие. Физико-химические и технологические процессы в твердых веществах протекают тем быстрее и полнее, чем больше поверхность участвующего в процессе вещества. Так как тонкий помол дорог и требует больших энергетических затрат, выбирают оптимальные значения тонины помола. Если вещество разрушается, каждая новая открывающаяся поверхность активна.

Механическую активацию рассматривают как изменение структуры материала посредством воздействия механических сил, придающих ему новые физические и химические свойства. Диапазон вызванных механической активацией изменений вещества или степень механической активации зависит как от структуры самого материала, так и от величины и вида воздействующих на него механических сил, а в случае периодически действующих сил — также от амплитуды и частоты их колебания.

Эффективность диспергирования твердых тел путем приложения механической силы раньше оценивали по изменению гранулометрического состава, а в настоящее время — по увеличению общей поверхности вещества. Эффективность помольных агрегатов тем выше, чем меньше расход энергии на создание новой поверхности.

Механическая активация характеризуется как следствие изменений вида и количества дефектов структуры материалов. При продолжающемся процессе обработки часть ранее возникших дефектов исчезает. В таких случаях механическая активация может быть увеличена путем интенсивной обработки.

Недостатком механической компоненты процесса выщелачивания является снижение химической активности и снижение эффективности процесса из-за слипания зерен обрабатываемого материала.

Для решения этой задачи в процессе дезинтеграции на сырье дополнительно воздействуют вибрацией в горизонтальной плоскости и подбрасыванием с колебаниями от 30 до 1500 Гц при амплитуде горизонтальных колебаний от 2 до 50 мм и амплитуде вертикальных подбрасываний до 30 мм [2].

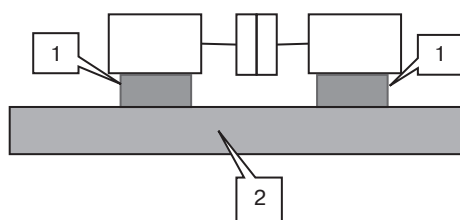


Рис. 2. Схема механической компоненты активации процесса выщелачивания:

1 — вибраторы; 2 — виброгасящая основа

[Fig. 2. Scheme of mechanical component of leaching process activation:

1 — vibrators; 2 — damping base]

Воздействие на обрабатываемый материал вибрацией с подбрасыванием обеспечивает очистку поверхностей зерен от налипания продуктов дезинтеграции и коагуляции микротрещин, повышая степень контакта выщелачивающего реагента с сырьем.

Полнота извлечения металла из хвостов обогащения влияет на прочность изготовленного на их основе бетона. Прочность бетонов при соединении возмож-

ностей химических и механических активаторов при одинаковом соотношении цемента и хвостовой добавки, количестве воды, заполнителя, тонкости помола добавки увеличивается на 30–40%.

Дезинтегратор установлен на виброплощадку, состоящую из вибровозбудителя, короба и виброизолирующих опор. Короб, установленный на упругую систему, совершает направленное возвратно-поступательное колебание. Хвосты, поступающие в дезинтегратор вместе с реагентом, дополнительно к основным процессам механохимической активации и выщелачивания совершают еще и поступательное движение с подбрасыванием. В процессе вибрации, контактируя с рабочими поверхностями дезинтегратора, частицы лишаются возможности слипаться между собой и прилипнуть к рабочим поверхностям, что обеспечивает повышение эффективности комбинированной механохимической активации хвостов.

Химическое воздействие. Недостатком механохимической технологии является неполное извлечение металлов в случае переработки упорных руд при недостаточной химической активности последних.

Хесс К., Штойнер Е. и Фромм Х. ввели в обиход понятие «механохимии» как разложение карбонатов, хлоридов и других веществ при обычных процессах помола в шаровых и вибромельницах, образование веществ, например, сернистых соединений и силикатов, увеличение растворимости веществ, ускорение химических реакций, усиление каталитических свойств, улучшение физико-технических свойств искусственных камней и полимеров, понижение реагирования. Эти показатели составляют основу и технологии выщелачивания в дезинтеграторе.

В отличие от механохимии выщелачивание в дезинтеграторе использует, кроме содержащихся в составе минерала химических элементов, более сильные искусственные реагенты, ускоряющие процесс выщелачивания.

Эффективность извлечения металлов из хвостов обогащения увеличивается, если перед подачей сырья в дезинтегратор хвосты в смеси с элементарной серой обработать раствором смеси серной и азотной кислот (рис. 3) [6].

Так, хвосты обогащения в виде пульпы при соотношении твердой фазы к жидкой 1:2 измельчают в смеси с элементарной серой в количестве 12% до крупности 100% фракции 0,01 мм. Обработку пульпы смесью кислот осуществляют при массовом соотношении последних 2:1 до доведения водородного показателя pH до значения 1 с дальнейшим его повышением в течение двух часов до значения 3.

В выщелачиваемой массе образуются окислители, которые переводят неокисленные упорные минералы металлов в легко вскрываемые формы. При дальнейшем выщелачивании разрушенные предварительной обработкой соединения

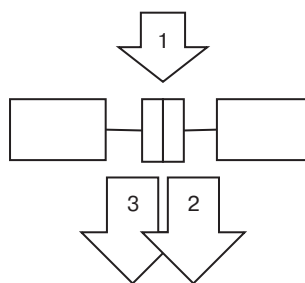


Рис. 3. Схема химической компоненты активации процесса выщелачивания: 1 — закисленное сырье; 2 — металлосодержащий раствор; 3 — вторичные хвосты
[Fig. 3. Scheme of chemical component of leaching process activation: 1 — acidified raw material; 2 — metal-containing solution; 3 — secondary tailings]

металлов переходят в растворимые комплексы. Обработка смесью серной и азотной кислот позволяет уменьшить или исключить расход сульфата меди, поскольку роль катализатора окисления выполняет нитрозилсерная кислота.

Преимущества технологии заключаются в существенном ускорении процесса выщелачивания и повышении извлечения металлов из упорных неокисленных руд.

Дезинтеграторы не только осуществляют механическую активацию веществ. При обработке поликристаллическое сырье разрушается по поверхностям спайности кристаллов, вследствие чего минералы или другие материалы, содержащие фазы различной прочности, измельчаются под действием ударов в различной степени, в том числе и по границе разделов фаз.

Поэтому процессы сепарирования фаз из обработанных в дезинтеграторе многофазных веществ при помощи вибрации, воздействия магнитных полей, флотации или других методов значительно упрощаются, а выход целевого продукта существенно увеличивается.

Комбинированное воздействие. После выщелачивания в дезинтеграторе сырье укладывают в штабели, кучи или траншеи, обрабатывают раствором серной кислоты, промывают водой и дополнительно выщелачивают серной кислотой с концентрацией 10—30 г/л. Последующее выщелачивание осуществляют раствором сульфидотриоксосульфата натрия с концентрацией 10—20 г/л [7].

Результатом является повышение эффективности извлечения металлов из хвостов обогащения за счет более глубокой проработки механохимически активированных структурных компонентов. Повышается извлечение металлов, и снижается удельный расход реагентов на выщелачивание за счет увеличения продолжительности извлечения полезных компонентов.

Возникает синергетический эффект при совмещении извлечения в дезинтеграторе и выщелачивания в штабеле, поскольку активированная в дезинтеграторе масса продолжает отдавать содержащиеся в ней металлы, увеличивая извлечение металлов по сравнению с обоими базовыми способами в отдельности.

Эколого-экономическая эффективность интенсификации процессов выщелачивания в дезинтеграторе состоит в том, что при сравнимых затратах из уже извлеченного из недр сырья извлекается большее количество металла за счет утилизации в настоящее время некондиционного по содержанию металлов сырья [8—9]. Это увеличивает минерально-сырьевую базу металлургического производства и упрочняет сырьевую безопасность государства.

В процессе механоактивации извлекаются все содержащиеся в хвостах металлы до уровня санитарных требований, после чего вторичные хвосты становятся пригодными для изготовления твердеющей смеси и иной товарной продукции без ограничений по санитарным требованиям, что радикально повышает полноту использования извлекаемых на земную поверхность минеральных ресурсов [10].

При обработке в дезинтеграторе независимо от качества сырья, различий в удельном весе и влажности образуется однородная смесь, которая повышает качество изделий из вторичных хвостов, например, твердеющих смесей.

Отличия технологии выщелачивания в дезинтеграторе заключаются в следующем:

- используется новый вид воздействия на минеральное сырье — большой энергией;
- возникает синергетический эффект, создающий возможности для прорывных технологий;
- появляется возможность извлекать из хвостов все металлы до фоновых значений;
- реализуется возможность ликвидации хранилищ хвостов переработки.

Вовлечение в производство колоссальных минеральных ресурсов создает новую сырьевую базу для горной промышленности и избавляет от необходимости вовлечения в эксплуатацию новых месторождений, что особо актуально ввиду дефицита ряда металлов для обеспечения национальной безопасности России.

Концепция радикальной утилизации отходов обогащения металлургии наиболее полно отвечает принципам взаимодействия человека и биосферы в интересах устойчивого развития земной цивилизации [11; 12]. Она особенно актуальна для решения проблем диверсификации регионального производства в условиях рыночной системы хозяйствования [13], а также при безотходном использовании ценных природных ресурсов в горнодобывающих регионах, где опасное производство соседствует с идеальными условиями для существования живого вещества [14–16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Проблема использования возобновляемых источников энергии в ходе разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 1. С. 88–96.
- [2] Голік В.И., Комащенко В.И., Моркун В.С. Механохимические процессы извлечения металлов из некондиционных руд: монография. Германия: LAP Lambert Academic Publ., 2015. 148 с.
- [3] Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр земли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S4-2. С. 5–11.
- [4] Голік В.И. Извлечение металлов из хвостов обогащения комбинированными методами активации // Обогащение руд. 2010. № 5. С. 38–40.
- [5] Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 4. P. 321–324.
- [6] Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 3. P. 38–41.
- [7] Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use // Metallurgical and Mining Industry. 2015. No. 3. P. 49–52.
- [8] Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // Горный журнал. 2013. № 12. С. 29–33.
- [9] Голік В.И., Комащенко В.И., Моркун В.С. Инновационные технологии комплексного использования хвостов обогащения переработки руд // Вісник Криворізького національного університету. Кривий Ріг: КНУ, 2015. № 39. С. 72–77.

- [10] *Голик В.И., Комащенко В.И., Заалишвили В.Б.* Способ извлечения металлов из хвостов обогащения. Патент № 2011105254/02(007422) от 25 мая 2012.
- [11] *Голик В.И., Комащенко В.И., Заалишвили В.Б.* Способ извлечения металлов из хвостов обогащения. Патент № 2011105254/02(007423) от 1 июня 2012.
- [12] *Голик В.И., Комащенко В.И., Заалишвили В.Б.* Способ извлечения металлов из хвостов обогащения. Патент № 2011105254/02(007423) от 25 мая 2012.
- [13] *Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н.* Обоснование полного цикла комплексного освоения недр при разработке месторождений твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 1. С. 447—455.
- [14] *Golik V.I., Komashchenko V.I.* Environmental technologies of massif control on geomechanics base M.: KDU, 2010. 556 p.
- [15] *Komaschenko V.I., Golik V.I., Drebenstedt K.* Effect of exploration and mining industry on the environment. M.: KDU, 2010. 356 p.
- [16] *Плешко М.С., Насонов А.А.* Внедрение эффективных геотехнологий на основе комплексного мониторинга всех стадий жизненного цикла горнодобывающего предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 11. С. 69—76.

© Голик В.И., Келехсаев В.Б., Майстров Ю.А., Олисаев А.С., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 07 апреля 2018

Дата принятия к печати: 15 июля 2018

Для цитирования:

Голик В.И., Келехсаев В.Б., Майстров Ю.А., Олисаев А.С. Направления совершенствования механохимических процессов при утилизации хвостов обогащения руд // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 365—377. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-365-377

Сведения об авторах:

Голик Владимир Иванович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного дела, Северо-Кавказский государственный технологический университет. *Область научных интересов:* разработка месторождений полезных ископаемых, способы добычи металлов выщелачиванием, утилизация отходов добычи и переработки минералов с активацией компонентов, подготовка кадров высшей квалификации. *Контактная информация:* e-mail: v.i.golik@mail.ru

Келехсаев Валерий Борисович — ассистент кафедры горного дела, Северо-Кавказский государственный технологический университет. *Область научных интересов:* разработка месторождений полезных ископаемых, способы добычи металлов выщелачиванием. *Контактная информация:* e-mail: v.i.golik@mail.ru

Майстров Юрий Александрович — аспирант кафедры горного дела, Северо-Кавказский государственный технологический университет. *Область научных интересов:* разработка месторождений полезных ископаемых, способы добычи металлов выщелачиванием. *Контактная информация:* e-mail: v.i.golik@mail.ru

Олисаев Аслан Сергеевич — аспирант кафедры горного дела, Северо-Кавказский государственный технологический университет. *Область научных интересов:* разработка месторождений полезных ископаемых, способы добычи металлов выщелачиванием. *Контактная информация:* e-mail: v.i.golik@mail.ru

Directions for improvement of mechanochemical processes of utilizing ore tailings

V.I. Golik, V.B. Kelekhsaev, Yu.A. Majstrov, A.S. Olisaev

North-Caucasian State Technological University
44, Nikolaev str., Vladikavkaz, 362021, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the problem of waste-free extraction of metals from the tailings of primary ore processing. It represents a generalized approach of development of a mechanochemical technology of metal extraction by leaching in disintegrator and includes a summary of existing views on the problem, an analysis of prospects of the technology and the real steps taken in this direction. In the article, the theory and practice of mechanochemical extraction of metals from ores is examined and the assessment of the existing state of subject matter is given.

The essence of the problem is that for the expansion of applications of the recommended technology, it must be improved. The article includes an introduction, a purpose statement and the results of improvement on the level of patents in Russian Federation. The article highlights the problems of increasing the speed and fullness of the extraction of metals remaining after primary processing by traditional beneficiation methods, provides arguments and scientific description of the new methods of intensification of metal leaching in a disintegrator. Particular attention is paid to the effectiveness of combination of the methods of interaction with a mineral in order to increase the degree of extraction which allows to reduce operating costs. The essence of the above is the following: the scope of application of the breakthrough technology of waste-free metal extraction from deadstock poor raw materials can be improved by the use of new and prospective technologies based on the increase of process energetics. The main significance of the study lies in the experimental confirmation of the phenomenon of waste-free metal extraction into bulk concentrate by repeated activation in a disintegrator.

The study's advantage is the argument for the need of development of the new technology in order to gain economic, environmental and strategic benefits. The study is pioneering. It opens up a cluster of new problems, for example, selective extraction of metals from a collective solution, optimizing the resistance of the working body of disintegrator, utilizing master solutions, etc.

Key words: Metal, ore, mechanochemistry, extraction, leaching, disintegrator, impact, experiment, activation

REFERENCES

- [1] Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., and Radchenko D.N. Utilization of renewable energy sources in hard mineral mining. *Journal of Mining Science*. 2015. Vol. 51. No. 1. 88–96. DOI: 10.1134/S1062739115010147
- [2] Golik V.I., Komashenko V.I., Morkun V.S. Mekhanokhimicheskie protsessy izvlecheniya metallov iz nekonditsionnykh rud: monografiya [Mechanochemical processes of metal extraction from offgrade ores: monograph]. Germany: LAP Lambert Academic Publ., 2015. 148 p. (In Russ.)
- [3] Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Radchenko D.N. Scientific and methodological bases of design of ecologically balanced cycle of comprehensive exploitation and conservation of the Earth's reserves. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]*. 2015.No. S4-2. 5–11. (In Russ.)
- [4] Golik V.I. Metals recovery from mineral processing tailings by combined activation methods. *Obogashchenie Rud [Mineral Processing]*. 2010. No. 5. 38–40. (In Russ.)
- [5] Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 4. 321–324.

- [6] Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 3. 38—41.
- [7] Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 3. 49—52.
- [8] Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V., Radchenko D.N. Rasshirenie syr'evoi bazy gornorudnykh predpriyatii na osnove kompleksnogo ispol'zovaniya mineral'nykh resursov mestorozhdenii [Expanding the raw material foundation of mining enterprises on the basis of combined utilization of mineral deposits]. *Gornyi Zhurnal [Mining journal]*. 2013. No. 12. 29—33. (In Russ.)
- [9] Golik V.I., Komashchenko V.I., Morkun V.S. Innovacionnye tekhnologii kompleksnogo ispol'zovaniya hvostov obogashcheniya pererabotki rud [Innovative technologies of combined utilization of ore processing tailings]. *Journal of Kryvyi Rih National University*. Kryvyi Rih: KNU Publ., 2015. No. 39. 72—77. (In Russ.)
- [10] Golik V.I., Komashchenko V.I., Zaalishvili V.B. Sposob izvlecheniya metallov iz khvostov obogashcheniya [Method of extraction of metals from ore tailings]. Patent № 2011105254/02 (007422) dated May 25, 2012. (In Russ.)
- [11] Golik V.I., Komashchenko V.I., Zaalishvili V.B. Sposob izvlecheniya metallov iz khvostov obogashcheniya [Method of extraction of metals from ore tailings]. Patent № 2011105254/02 (007424) from June 1, 2012. (In Russ.)
- [12] Golik V.I., Komashchenko V.I., Zaalishvili V.B. Sposob izvlecheniya metallov iz khvostov obogashcheniya [Method of extraction of metals from ore tailings]. Patent № 2011105254/02 (007423) dated May 25, 2012. (In Russ.)
- [13] Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Obosnovanie polnogo tsikla kompleksnogo osvoeniya nedr pri razrabotke mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh [Explanation of the full cycle of integrated subsoil development in mining solid mineral deposits]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]*. 2011. No. 1. 447—455. (In Russ.)
- [14] Golik V.I., Komashchenko V.I. Environmental technologies of massif control on geomechanics base. Moscow: KDU Publ., 2010, 556 p.
- [15] Komashchenko V.I., Golik V.I., Drebenstedt K. Effect of exploration and mining industry on the environment. Moscow: KDU Publ., 2010, 356 p.
- [16] Pleshko M.S., Nasonov A.A. Vnedrenie effektivnykh geotekhnologii na osnove kompleksnogo monitoringa vsekh stadii zhiznennogo tsikla gornodobyvayushchego predpriyatiya [Introduction of effective geotechnologies on the basis of combined monitoring of all stages of mining enterprise life cycle]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]*. 2013. No. 11. 69—76. (In Russ.)

Article history:

Received: April 07, 2018

Accepted: July 15, 2018

For citation:

Golik V.I., Kelekhsaev V.B., Majstrov Yu.A., Olisaev A.S. (2018). Directions for improvement of mechanochemical processes of utilizing ore tailings. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(3), 365—377. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-365-377

Bio note:

Vladimir I. Golik — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mining, North Caucasus State Technological University. *Research interests:* development of mineral deposits, methods of extraction of metals by leaching, utilization of waste from production and processing of minerals with activation of components, training of highly qualified personnel. *Contact information:* e-mail: v.i.golik@mail.ru

Valery B. Kelehsaev — Assistant of the Department of Mining, North Caucasus State Technological University. *Research interests*: development of mineral deposits, methods of extraction of metals by leaching. *Contact information*: e-mail: v.i.golik@mail.ru

Yuri A. Maistrov — Postgraduate student of the Department of Mining, North Caucasus State Technological University. *Research interests*: development of mineral deposits, methods of extraction of metals by leaching. *Contact information*: e-mail: v.i.golik@mail.ru

Aslan S. Olisaev — Postgraduate student of the Department of Mining, North Caucasus State Technological University. *Research interests*: development of mineral deposits, methods of extraction of metals by leaching. *Contact information*: e-mail: v.i.golik@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-378-390

УДК 551.24: 553.98: 551.435.77 (567)

Морфонеотектоника и перспективы нефтегазоносности пустынь Ирака

А.С.Я. Аль-Гурейри¹, А.К. Наравас¹, В.М. Усова²

¹ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23

² Российский университет дружбы народов (РУДН)
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Рассмотрены перспективы нефтегазоносности Ирака. Последние исследования показывают перспективность территории пустынь Ирака. Определены следующие основные морфотектонические процессы: омоложение речной сети и возникновение новых речных бассейнов; разделение отдельных рек на две и более части; перехват речной сети. В результате многолетних полевых и камеральных геолого-геоморфологических исследований в районе Западной и Южной пустынь удалось восстановить существующую тектоническую активность района от миоцена до наших дней. Региональный Евфратский разлом на территории Ирака занимает исключительно важное место. Оперяющие к нему разломы нижеследующего порядка образуют систему долгоживущих тектонических блоков с различной кинематикой и морфологией. Установлены причины и механизм неотектонических неоген-четвертичных подвижек земной поверхности. Выделены отдельные тектонические блоки, образующие в целом зональные области поднятий или долин. Области приподнятых блоков (например, поднятие Наджаф третьего порядка) создают пликативные купольные структуры в чехле вблизи с Евфратским разломом, благоприятные для скопления углеводородов.

Ключевые слова: Евфратский разлом, Арабская плита, сейсмический профиль, объекты углеводородов, Месопотамский прогиб, геологические колонки, морфотектонические процессы

Введение

Изучение неотектонического строения территории пустынь Ирака, включающей Западную и Южную Пустыни (ЗЮП), крайне важно, поскольку здесь находятся многочисленные населенные пункты и промышленные объекты. Без понимания тектонической кинематики отдельных блоков нельзя прогнозировать современный рельеф. Вместе с тем исследованная территория расположена вблизи нефтегазоносного района на северо-востоке, притом что недавнее землетрясение (декабрь 2017 г.) по Евфратскому разлому проявилось выходами газов и битумов.

На сегодняшний день существуют различные представления о новейшей тектонике территории пустынь Ирака, в том числе о роли разломов фундамента и чехла в формировании неоструктур, что сдерживает геологическое понимание региона.

Цель работы — неотектоническое районирование территории пустынь Ирака и изучение их структурно-геоморфологического строения для хозяйственных целей и прогнозирования нефтегазоносности территории.

До недавнего времени в Ираке фактическими объектами углеводородов (УВ) была область западного склона гор Загрос (рис. 1), переходящего в Месопотамский прогиб [1; 2]. Сразу отметим, что этот прогиб структурно схож с Западным Предуральским, который известен промышленными запасами УВ [3]. При этом пустынные районы Ирака, находящиеся на Арабской плите, не привлекали внимания исследователей. Разбурена без большого успеха только южная часть Ирака, вблизи границы с Кувейтом [4]. Однако последние исследования показывают перспективность на УВ территории пустынь Ирака.

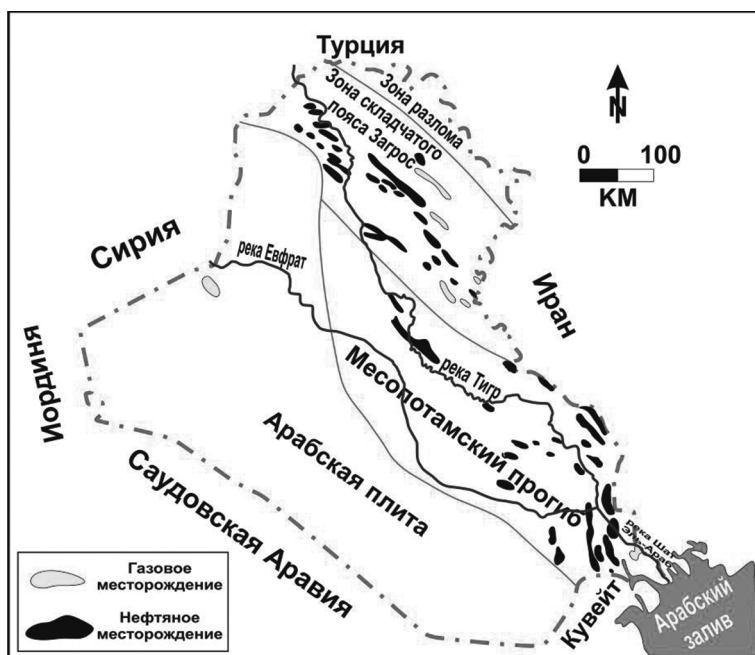


Рис. 1. Расположение нефтегазоносных месторождений Ирака
[Fig. 1. Location of oil and gas bearing fields in Iraq]

Толщина земной коры в регионе оценивается мощностью до 100 км. Эта интерпретация согласуется с сейсмическим профилем через Месопотамию, основанным на комбинированной глубинной сейсмической рефракции, гравитации и магнитных данных [5]. Предполагаемая глубина залегания кровли фундамента в пустынях Ирака, по интерпретации аэромагнитных данных специалистов СССР “CGG” (1974), составляет 7–10 км с уклоном на северо-восток. Толщина земной коры увеличивается с севера изучаемой территории на юг в Кувейт. Чехольный комплекс представлен отложениями палеозоя, мезозоя и кайнозоя.

Территории пустынь Ирака включают в себя Западную и Южную пустыни (ЗЮП), которые расположены в основном на Арабской плите и частично на Месопотамской равнине к западу от горной местности Загрос. Эта территория оказалась тектонически активна в разные геологические периоды.

На рисунке 2, *а* приведена обобщенная геологическая колонка пород Арабской плиты, а на рис. 2, *б* — Месопотамии. Наблюдается существенное, в десятки раз, увеличение мощностей пород почти симметрично от Евфратского разлома, что в пределах Месопотамской впадины, и на Арабской плите.

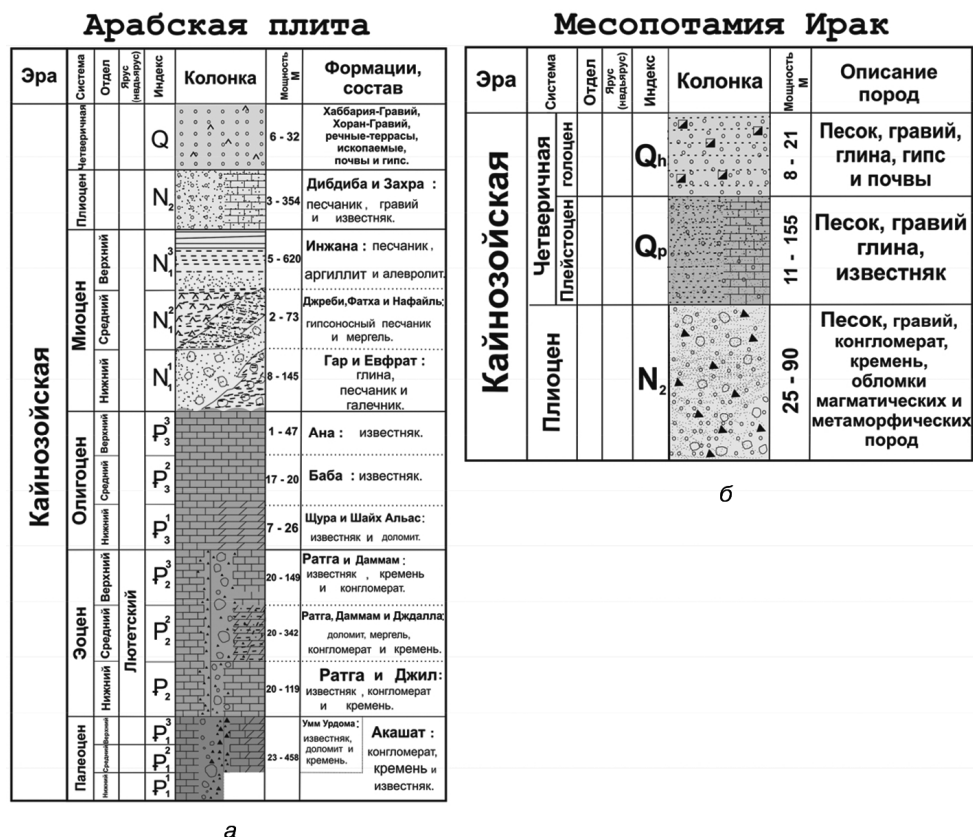


Рис. 2. Геологические колонки: *а* — по площади Месопотамии; *б* — по Арабской плите [Fig. 2. Geological columns: *a* — Mesopotamia region; *б* — Arabian plate]

На площади Месопотамии в плейстоцене отмечается трансгрессивная серия пород, на фоне аккумулятивных континентальных отложений плиоцена и голоцена. Приподнятая Арабская плита демонстрирует регрессивный разрез миоцена с базальными галечниками в основании, что говорит о существенной тектонической перестройке в регионе и подъеме источника сноса на юго-западе Арабско-го Шелта в связи с альпийской активизацией.

Палеозойский разрез слагают породы каменноугольной и пермской систем. Мезозойский комплекс представлен отложениями верхнего триаса, юры и мела. Кайнозой представлен комплексом палеогеновых, неогеновых и четвертичных отложений. Палеоген распространен в ЗЮП. Неогеновая система развита западнее долины р. Евфрат (рис. 3).

В неоген-четвертичное время главным тектоническим региональным модулятором был глубинный долгоживущий Евфратский разлом, который протягивается через территорию Ирака более чем на 500 км. Его образование связывают с

расколом земной коры в результате горизонтального древнего сдвига территории Месопотамии относительно Арабской плиты в палеозойское время. При этом Евфратский разлом фактически отделяет Месопотамскую впадину от Арабской плиты. Как следствие, в фундаменте появились оперяющие долгоживущие трещины, которые образовали отдельные тектонические блоки. Система оперяющих трещин различного порядка в фундаменте оказалась рельефообразующей и образовала в осадочном чехле отдельные тектонические блоки с различными вертикальными перемещениями [7].

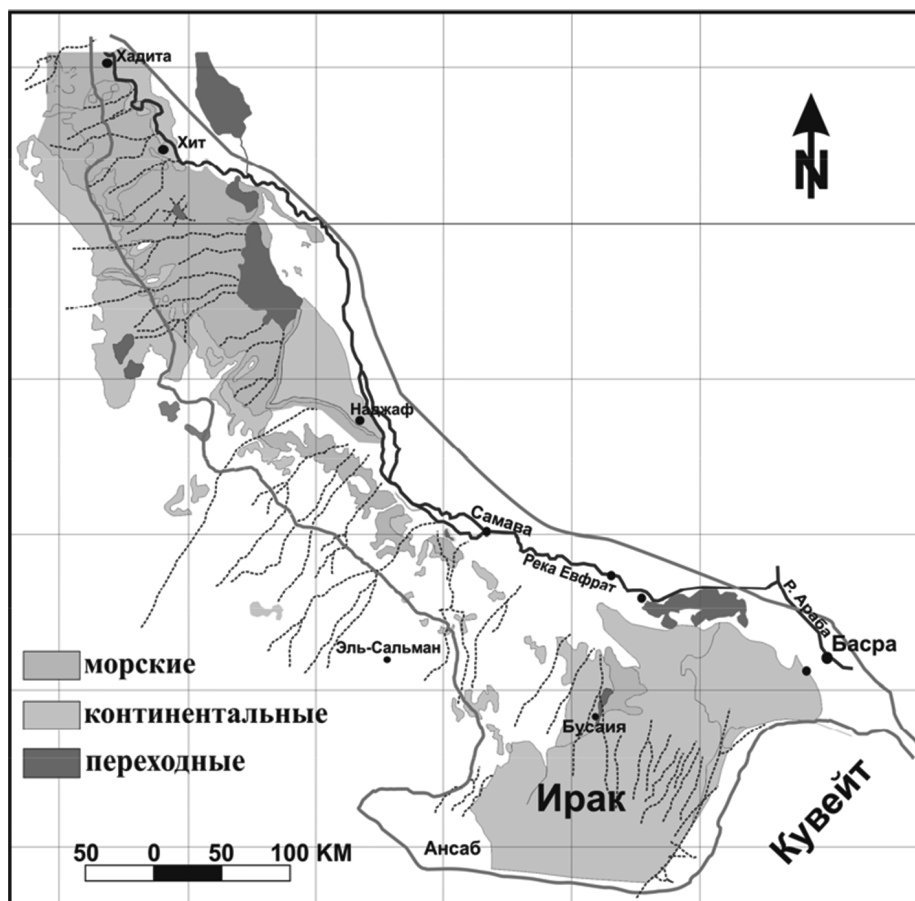


Рис. 3. Условия осадконакопления неогеновых отложений на исследованной территории (граница показана сплошной линией). Составил: Аль-Гурейри по [1; 5; 6]
[Fig. 3. Conditions of sedimentation of Neogene deposits in the explored territory (border shown by solid line)]

Вслед за А.В. Орловой мы считаем, что «рельеф поверхности создается главным образом за счет вертикальных перемещений» [7]. В результате изучения современных речных долин в регионе были определены следующие основные морфотектонические процессы:

- омоложение речной сети и возникновение новых речных бассейнов;
- разделение отдельных рек на две и более части;
- перехват речной сети.

Отметим, что «морфотектоника» — быстро развивающееся направление геоморфологии, выявляет роль тектонических процессов в формировании рельефа территории.

В процессе формирования современного рельефа произошли многофакторные геологические процессы. Большинство из них оказались латентными. Однако отмечались и такие, которые имели внешнее проявление, например, неоднократно происходило локальное омоложение русла р. Евфрат вблизи города Самава и ее притоков (рис. 4).

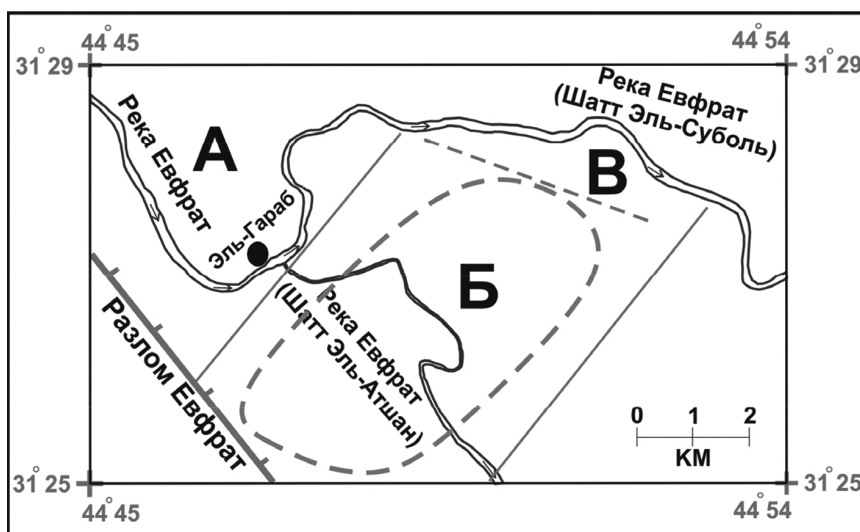


Рис. 4. Иллюстрация активации тектонических блоков, прилегающих к разлому Евфрат с изменением русла реки Евфрат: А — основное русла реки Евфрат; Б — участок активизации; В — современное положение русла реки Евфрат

[Fig. 4. Illustration of activation of tectonic blocks adjacent to the Euphrates fault with the change in Euphrates River stream: А — Main stream of Euphrates River; Б — Activation site; В — Current stream position of the Euphrates River]

В процессе активизации зоны Евфратского разлома образовалось поднятие части территории в восточной части Южной пустыни. Процесс омоложения русла Евфрата с возникновением нового базиса эрозии происходил в 1930-е гг., после чего самопроизвольно остановился, хотя предпринимались попытки правительственных организаций предотвратить прогрессирующее продвижения естественного водопада (4 м) на север, против течения реки. Процесс омоложения р. Евфрат был вызван тектоническими движениями и активизацией разломной системы Евфрат, что проявилось в поднятии отдельных тектонических блоков прилегающей территории, заставившей углубиться руслу реки попятной эрозией [8].

Неотектоническая активность проявилась также в «речных перехватах» в виде ухода русла в соседний водоток в результате подъема тектонического блока и подпруживания русла. Наиболее выраженный участок речного перехвата расположен между бассейнами Вади Садир и Вади Або Гуваир. Здесь русло Вади Садир «захватило» часть русла Або Гуваир (отведенный поток). При сопоставлении участков речных перехватов с геологическими картами и спутниковыми изображениями

ями отмечено, что долины совпадают с направлением перечисленных структур и в большей степени с разломными зонами. Морфотектонические процессы проявились также в перестройке речных долин, которые привели к изменению участков долин в нижнем течении. Так, в бассейне Вади Хавими процесс тектонического поднятия привел к разделению речной сети на две части.

Кроме того, установлено восемь аллювиальных конусов выноса, которые сформировались в депрессии Салибат, отличающихся между собой временем образования, ориентировкой, формой и размерами. Они имеют отчетливую разницу в высотных отметках вершин и дельтовых разгрузок. Отметим, что аллювиальные конусы выноса развиваются, как правило, в тектонически активных районах [9].

Для картирования неотектонических признаков в ЗЮП построены многочисленные геолого-геоморфологические профили. На рисунке 5 приведены в качестве примера несколько типичных таких профилей, где видны новейшие пликативные деформации на территории ЗЮП.

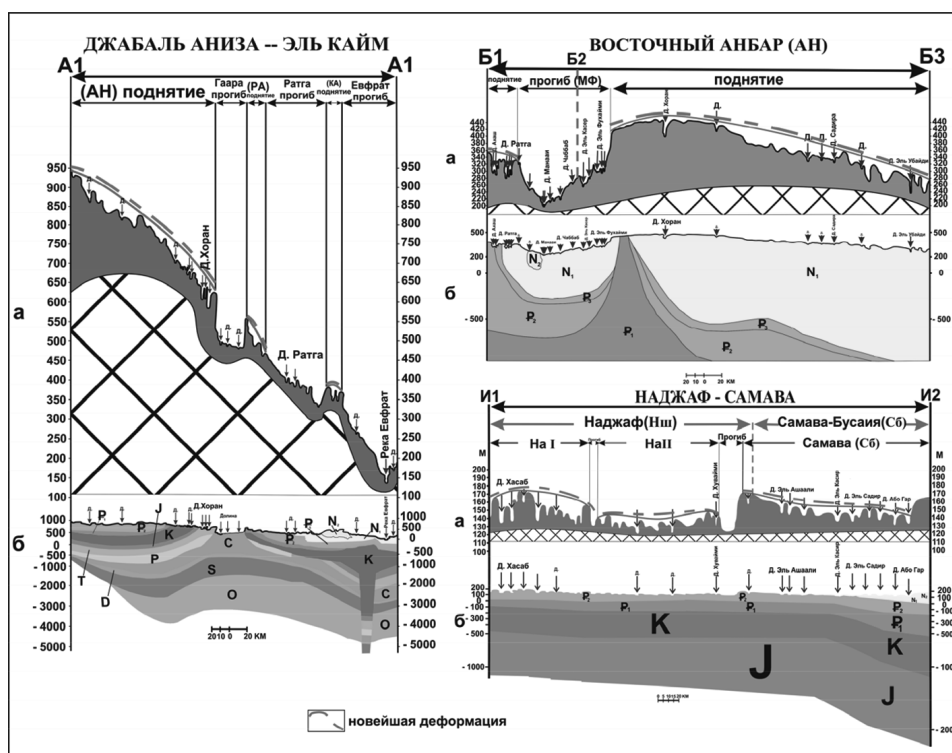


Рис. 5. Геолого-геоморфологические профили по территории ЗЮП

[Fig. 5. Geological-geomorphological profiles along the territory of the Western and Southern deserts]

В основу проведенного неотектонического районирования территории ЗЮП положено изучение конэрозионных структурных форм, проявившихся в рельефе в современную эпоху. При этом рассматриваются три уровня рангов геоморфологических структур, где первому рангу соответствуют наиболее крупные мегаподнятия: Рутба (РУ) и Западный Евфрат (ЗЕ) и разделяющий их прогиб Маания-Нухайб (МН) (рис. 6). Второй и третий ранговые структурные уровни касаются более низких порядков структур.

В результате многолетних полевых и камеральных геолого-геоморфологических исследований в районе ЗЮП удалось восстановить существующую тектоническую активность района от миоцена до наших дней. Установлено, что региональный Евфратский разлом на территории Ирака занимает исключительно важное место, что ранее было недооценено. Оперяющие к нему разломы нижеследующего порядка образовали систему долгоживущих тектонических блоков с различной кинематикой и морфологией. Установлены причины и механизм неотектонических неоген-четвертичных подвижек земной поверхности. Таким образом, выделены отдельные тектонические блоки, образующие в целом зональные области поднятий или долин (рис. 6, А). Области приподнятых блоков (например, поднятие Наджаф третьего порядка) создают пликативные купольные структуры в чехле вблизи с Евфратским разломом, благоприятные для скопления УВ (рис. 6, В).

Прямой связи нефтегазоносности и размаха неотектонических движений в мире не отмечено [10]. Однако их воздействие обычно сопровождается ухудшением экранирующих свойств покровных в пределах интенсивно растущих структур и проникновением УВ в верхние горизонты чехла.

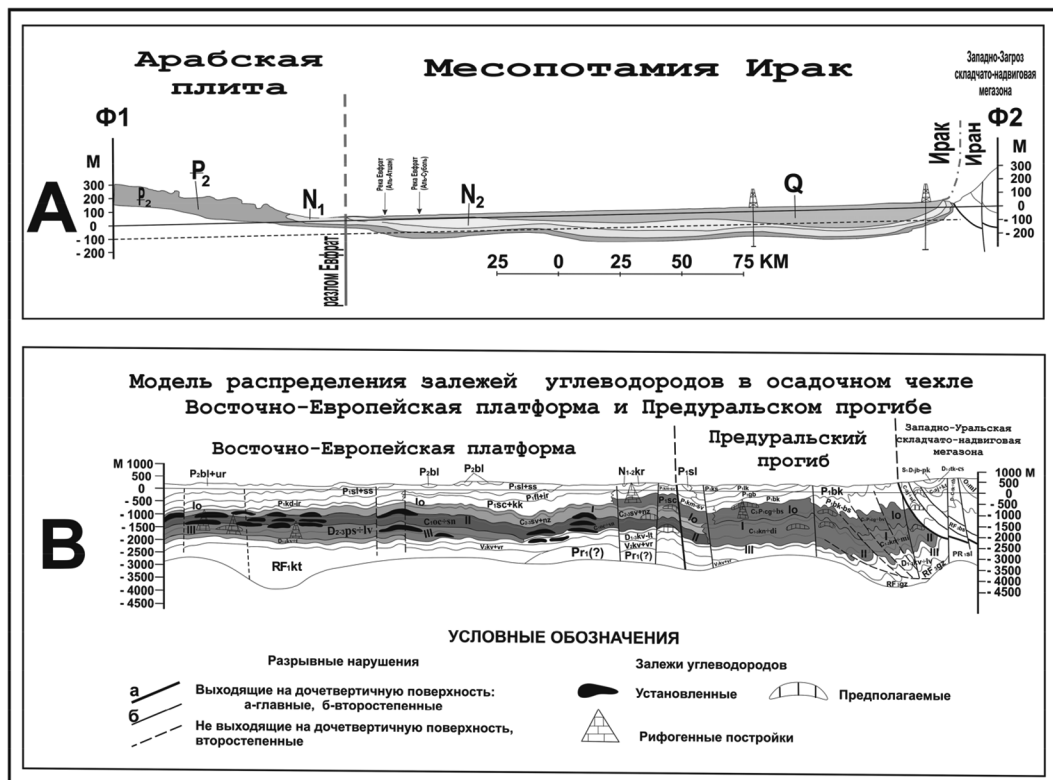


Рис. 7. Сравнительное исследование зоны геолого-тектонических сходств между Ираком и Российской Федерацией и распределение нефтяных и газовых месторождений:

А — геолого-геоморфологический разрез через Ирак [1; 4]; В — модель распределения залежей УВ в осадочном чехле ВЕП и ПП [14]

[Fig. 7. Comparative study of the geological-tectonic similarities zone between the Iraq and the Russian Federation and the distribution of oil and gas fields: А — Geological and geomorphological section through Iraq; В — Distribution model of hydrocarbon deposits in the sedimentary cover of East European Craton and Pre-Ural foredeep]

При этом может происходить разрушение верхних залежей многопластовых месторождений и образование УВ аномалий у самой поверхности [11]. Сейсмическая активность территории способствует образованию временных путей фильтрации УВ из нижележащих залежей. В результате возникает «УВ-дыхание» Земли.

Участки с доказанной нефтегазоносностью характеризуются, как правило, средними и высокими значениями плотности линеаментов [12]. По всей видимости, зона Евфратского разлома вполне соответствует такому случаю. Кроме того, «идея о связи размещения месторождений нефти с крупнейшими разломами не нова: она использовалась еще Д.И. Менделеевым (1876) при его аргументации неорганического происхождения нефти (карбидная теория)» [10].

На рисунке 7, А приведен показательный геолого-геоморфологический разрез кайнозойских отложений через Ирак, в крест Евфратскому разлому (включая Арабскую плиту), а на рисунке 7, В через восточный край ВЕП и Предуральский прогиб (ПП). Здесь отчетливо видно, как Евфратский разлом отделяет Арабскую приподнятую плиту от Месопотамской впадины, аналогично тому, как тектоническая шовная зона разграничивает ВЕП от ПП. Основные месторождения УВ, в отличие от Ирака, отмечены в пределах ВЕП, которые как бы окружают разрывные нарушения, не выходящие на дочетвертичную поверхность, но достигают фундамента. Корчуганова Н.И. отмечает, что «неотектонические структуры накладываются как на складчатые пояса, так и на древние платформы...» [13. С. 10].

Как показано ранее, геологическая активность территории находится в прямой зависимости от глубинного долгоживущего Евфратского разлома, а также сложной тектонической зоны трещин одноименного названия. Поэтому в целом область пустынь Ирака — ЗЮП, расположенная на Арабской плите, находится на сегодня в чрезвычайно активной тектонической зоне, причем эта активность объясняется региональной альпийской активизацией.

Недавнее землетрясение в декабре 2017 г. в 35 км от г. Эль-Наджаф Эль-Ашраф, который расположен вблизи этого разлома, проявилось в пределах поднятия Наджаф образованием зияющих крупных трещин (более 30 см) поверхности Земли с видимым пламенем горящих природных газов и битумов (рис. 6, С, 3). На рисунке 6, С,2 показано фото местности землетрясения.

Последние факты дают дополнительный аргумент в пользу перспективности поиска УВ в этом районе. Отметим, что эпицентр землетрясения и прогнозируемый объект УВ находятся в пределах одного купольного поднятия Наджаф.

Заключение

На территории пустынь Ирака опережающие трещины к глубинному Евфратскому разлому являются рельефообразующими для тектонических поднятий и прогибов в чехле, что проявилось в современном изменении положения и морфологии русел рек, а также пустынных долин за счет вертикальных перемещений.

Современный тектонический план территории пустынь Ирака от миоцена до наших дней сформировал сегментированно-зональные области осадочного чехла.

Области крупных зонально сгруппированных антиклинальных структур — современных поднятий вблизи Евфратского разлома перспективны на углеводородное сырье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Rafa'a Z. Jassim, Buthaina S. Al-Jiburi*. Stratigraphy of Iraqi Southern Desert, Iraqi Bull. Geology. Minute. 2009. Special Issue. P. 53–76.
- [2] *Sissakian V.K.* Geological map of Iraq. 3rd edition. Scale 1: 1 000 000. GEOSURV. Baghdad. Iraq, 2000.
- [3] *Караулов В.Б.* Стратиграфия, геологические формации, тектоника (избранные труды). М.: ГЕОС, 2015. 594 с.
- [4] *Yacoub Sabah Y.* Stratigraphy of the Mesopotamia plain. Iraqi Bull. Geology. Minute. Special issue. 2011. № 4. P. 47–82.
- [5] *Sissakian Varoujan K., Mohammed Buthaina S.* Stratigraphy of the Iraqi Western Desert. Iraqi Bull. Geology. Minute. Special Issue. 2007. P. 51–124.
- [6] *Jassim S.Z., Goff J.C.* Geology of Iraq. Published by Dolin. Prague and Moravian Museum. Brno, 2006. 341 p.
- [7] *Орлова А.В.* Блочные структуры и рельеф. М.: Недра, 1975. 232 с.
- [8] *Al-Gurairy Ahmad S. Yasien*. The Geomorphological Characteristics of The Stream of Euphrates River and its Branches of Al-Atshan and Al-Sebil Between Al-Shannafia and Al-Samawa. College of Arts — University of Baghdad. Baghdad. Iraq, 2000. 162 p.
- [9] *Buday T.* The Regional Geology of Iraq. Stratigraphy and Paleogeography. GEOSURV. Baghdad. Iraq, 1980. Vol. 1.
- [10] *Валеев Б.М.* Углеводородная дегазация Земли, геотектоника и происхождение нефти и газа (признание и развитие идей П.Н. Кропоткина) // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина). М.: ГЕОС, 2012. С. 20–42.
- [11] *Петухова А.В., Старобинца И.С.* Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений. М.: 1993. 332 с.
- [12] *Смирнова И.О., Русанова А.А.* Использование материалов дистанционного зондирования при изучении геологического строения нефтегазоносных бассейнов и прогнозировании углеводородного сырья // Региональная геология и металлогения. 2004. № 4. С. 95–104.
- [13] *Корчуганова Н.И.* Новейшая тектоника с основами современной геодинамики: методическое руководство. М.: Геокарт; ГЕОС, 2007. 353 с.
- [14] Государственная геологическая карта Российской Федерации. Уральская серия. 0–40. Масштаб 1:1 000 000. Третье поколение. Карта прогноза на нефть и газ. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015.

© Аль-Гурейри А.Я., Наравас А.К., Усова В.М., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 12 мая 2018

Дата принятия к печати: 15 июля 2018

Для цитирования:

Аль-Гурейри А.Я., Наравас А.К., Усова В.М. Морфонеотектоника и перспективы нефтегазоносности пустынь Ирака // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 378–390. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-378-390

Сведения об авторах:

Ахмад Ясин Аль-Гурейри — аспирант кафедры общей геологии и геокартирования, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ). *Область научных интересов:* поиск и разведка месторождений углеводородов, изучение геологического строения Арабской плиты и Месопотамии. *Контактная информация:* e-mail: ahmad.yasien@mail.ru

Антон Казимирович Наравас — доцент кафедры общей геологии и геокартирования, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ). *Область научных интересов:* поиск и разведка месторождений углеводородов, изучение геологического строения Арабской плиты и Месопотамии. *Контактная информация:* e-mail: gazon91@list.ru

Усова Валентина Михайловна — старший преподаватель департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* поиск и разведка месторождений углеводородов, изучение геологического строения Арабской плиты и Месопотамии. *Контактная информация:* e-mail: usova_vm@pfur.ru

Morphoneotectonics and prospects of oil and gas presence in deserts of Iraq

Ahmad S. Yasien Al-Gurairy¹, A.K. Naravas¹, V.M. Usova²

¹ Russian State Geological Prospecting University (Moscow Geological Prospecting Institute)

23, Miklukho-Maklaya str, Moscow, 117997, Russian Federation

² Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

Abstract. The article deals with the prospects of Iraq's oil and gas potential. It should be noted that there has not been much attention paid to the desert regions of Iraq located on the Arabian plate. However, recent studies show prospectivity of the Iraq deserts. As a result of the recent investigation of river valleys in the region, the following main morphotectonic processes were identified: rejuvenation of the river network and emergence of new river basins; division of individual rivers into two or more parts; interception of the river network. As a result of long-term field and cameral geological and geomorphological studies in the area of the Western and Southern deserts, it was possible to reconstruct the existing tectonic activity of the area from the Miocene period to the present day. It is established that the regional Euphrates fault on the territory of Iraq occupies an exceptionally important place, which was previously underestimated. Adjacent echelon faults of the following order formed a system of pre-existent tectonic blocks with different kinematics and morphology. The causes and mechanism of neotectonic Neogene-Quaternary movements of the earth's surface are established. Thus, separate tectonic blocks are identified, which generally form zonal regions of uplifts or valleys. The areas of elevated blocks (for example, the raising of Al-Najaf Al-Ashraf of the third order) are created by plicative dome structures in the cover near the Euphrates fault, favorable for the accumulation of HC.

Key words: Euphrates fault, Arabian plate, seismic profile, hydrocarbon objects, Mesopotamian depression, geological columns, morphotectonic processes

REFERENCES

- [1] Rafa'a Z. Jassim, Buthaina S. Al-Jiburi. Stratigraphy of Iraqi Southern Desert. Iraqi Bull. Geology. Minute. 2009. Special Issue. P. 53—76.
- [2] Sissakian V.K. Geological map of Iraq. 3rd edition. Scale 1: 1 000 000. GEOSURV. Baghdad. Iraq, 2000.

- [3] Karaulov V.B. Stratigrafiya, geologicheskie formacii, tektonika (izbrannye trudy) [Stratigraphy, geological formations, tectonics (selected works)]. Moscow: GEOS Publ., 2015. 594 p. (In Russ.)
- [4] Yacoub Sabah Y. Stratigraphy of the Mesopotamia plain, Iraqi Bull. Geology. Minute. Special issue. 2011. No. 4. P. 47–82.
- [5] Sissakian Varoujan K., Mohammed Buthaina S. Stratigraphy of the Iraqi Western Desert. Iraqi Bull. Geology. Minute. Special Issue. 2007. P. 51–124.
- [6] Jassim S.Z., Goff J.C. Geology of Iraq. Published by Dolin. Prague and Moravian Museum. Brno, 2006. 341 p.
- [7] Orlova A.V. Blokovye struktury i rel'ef [Block structure and topography]. Moscow: Nedra Publ., 1975. 232 p. (In Russ.)
- [8] Al-Gurairy Ahmad S. Yasien. The Geomorphological Characteristics of The Stream of Euphrates River and its Branches of Al-Atshan and Al-Sebil Between Al-Shannafia and Al-Samawa. College of Arts — University of Baghdad. Baghdad. Iraq, 2000. 162 p.
- [9] Buday T. The Regional Geology of Iraq. Stratigraphy and Paleogeography. GEOSURV. Baghdad. Iraq, 1980. Vol. 1.
- [10] Valeev B.M. Uglevodorodnaya degazaciya Zemli, geotektonika i proiskhozhdenie nefti i gaza (priznanie i razvitie idej P.N. Kropotkina) [Hydrocarbon degassing of the Earth, geotectonics and origin of oil and gas (recognition and development of ideas of P.N. Kropotkin)]. In proc. the Degassing of the Earth and Genesis of oil and gas deposits (to the 100 anniversary from the birthday of academician P.N. Kropotkin). Moscow: GEOS Publ., 2012. 20–42. (In Russ.)
- [11] Petuhova A.V., Starobinca I.S. Osnovy teorii geohimicheskikh polej uglevodorodnyh skoplenij [Fundamentals of the theory of geochemical fields of hydrocarbon accumulations]. Moscow: 1993. 332 p. (In Russ.)
- [12] Smirnova I.O., Rusanova A.A. Ispol'zovanie materialov distancionnogo zondirovaniya pri izuchenii geologicheskogo stroeniya neftegazonosnyh bassejnov i prognozirovanii uglevodorodnogo syr'ya [The use of remote sensing materials in the study of the geological structure of oil and gas basins and forecasting of hydrocarbon raw materials]. Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and metallogeny]. VSEGEI Publ., 2004. No. 4. 95–104. (In Russ.)
- [13] Korchuganova N.I. Novejshaya tektonika s osnovami sovremennoj geodinamiki Metodicheskoe rukovodstvo [The newest tectonics with the basics of modern geodynamics. Methodological guidance]. Moscow: Geocart; GEOS Publ., 2007. 353 p. (In Russ.)
- [14] Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossisko Federacii. Ural'skaya seriya [State geological map of the Russian Federation. A Series of the Ural]. 0–40. Scale 1: 1 000 000. Third generation. Forecast map for oil and gas. Saint Petersburg: VSEGEI Publ., 2015. (In Russ.)

Article history:

Received: May 12, 2018

Accepted: July 15, 2018

For citation:

Al-Gurairy A.S.Y., Naravas A.K., Usova V.M. (2018). Morphoneotectonics and prospects of oil and gas presence in deserts of Iraq. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(3), 378–390. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-378-390

Bio Note:

Ahmad S. Yasien Al-Gurairy — Postgraduate student of the Department of General Geology and Geological Mapping, Russian State Geological Prospecting University (Moscow Geological Prospecting Institute). *Research interests*: search and exploration of hydrocarbon fields, study of the geological structure of the Arab plate and Mesopotamia. *Contact information*: e-mail: ahmad.yasien@mail.ru

Anton K. Naravas — Associate professor of the Department of General Geology and Geological Mapping, Russian State Geological Prospecting University (Moscow Geological Prospecting Institute). *Research interests:* search and exploration of hydrocarbon fields, study of the geological structure of the Arab plate and Mesopotamia. *Contact information:* e-mail: gazon91@list.ru

Valentina M. Usova — Senior lecturer Department of Geology, Mining and Oil and Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests:* search and exploration of hydrocarbon fields, study of the geological structure of the Arab plate and Mesopotamia. *Contact information:* e-mail: usova_vm@pfur.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-391-401

УДК 550.8.05

Решение геолого-технологических задач в карбонатных разрезах с развитой вторичной емкостью на примере месторождения Волго-Уральской нефтегазоносной провинции

Е.Г. Исайчева, Л.Р. Фаттахов, Р.Ф. Абдулкеримов

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

Рассмотрены решения геолого-технологических задач на примере карбонатного разреза месторождения Волго-Уральской нефтегазоносной провинции в поглощающих скважинах. В настоящее время по способам скважинной геофизики эффективно рассчитывается емкость коллекторов в изотропной среде. При наличии трещинной и каверновой пористости стандартные методы электротометрии оказываются нерезультативными даже для качественной интерпретации. Поэтому в сложном коллекторе с вторичной структурой порового пространства используется построение интерпретационной модели по комплексу следующих методов геофизических исследований скважин: нейтронных методов, акустического каротажа и гамма-гамма плотностной метод. Для ликвидации поглощений были использованы как стандартные методы, так и новейшие разработки. Показана эффективность использования профильных перекрывателей в поглощающих скважинах.

Ключевые слова: вторичная пористость, сложный коллектор, профильный перекрыватель, интерпретационная модель, бурение

Введение

Отличительными особенностями Волго-Уральской нефтегазоносной провинции является наличие карбонатных коллекторов с развитой вторичной пористостью. На фоне общего усложнения условий разработки современных месторождений изучение данного региона представляет повышенный интерес. Сложные коллекторы представлены не только карбонатными коллекторами, также сложными являются: коллекторы с многофазным насыщением, нефтематеринские породы.

На сегодняшний день многие старые месторождения уже истощены. Пополнение категории запасов нефти и газа из категории перспективных ресурсов идет в основном за счет пересмотра состояния выше- или нижележащих пластов в уже разрабатываемом горизонте, а не путем открытия совершенно новых залежей. Пласты, которые раньше считались неколекторами, сегодня переводят в разряд продуктивных пластов с хорошими фильтрационно-емкостными свойствами. Главной причиной этого является эффективное изучение вторичной пористости

карбонатных коллекторов и более ясное понимание условий образования и путей фильтрации коллектора с трещинной и кавернозной пористостью.

Цель работы — геолого-технологическое обоснование применения профильных перекрывателей в поглощающих скважинах.

Материалы и методы

Объект исследования — карбонатный разрез одного из месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Комплекс геолого-технологических исследований (ГТИ) в процессе бурения, оперативная обработка и интерпретация результатов, своевременное проведение комплекса геофизических исследований скважин (ГИС) значительно повышают геологическую эффективность работ, их однозначность, достоверность результатов и дают ощутимый экономический эффект в строительстве скважин.

Чем сложнее разрез, тем больший комплекс геофизических исследований требуется для его изучения, тем сложнее интерпретация результатов. При правильном применении служба ГТИ является эффективным инструментом получения оперативной информации при бурении скважин. На сегодня это является немаловажным фактором, так как требуются все более дорогостоящие технологические решения при бурении скважин и эксплуатации залежей со сложными коллекторами.

В связи с этим выделены следующие задачи:

- создание интерпретационной модели вторичной пористости карбонатного коллектора;
- сравнение различных методов борьбы с поглощением при вскрытии карбонатных разрезов;
- оценка эффективности профильных перекрывателей в поглощающих скважинах.

Интерпретационная модель строится на основе данных петрофизических исследований и результатов промыслово-геофизических работ. Ввиду трудности определения стандартными лабораторными способами полезной пористости сложных видов пластов предлагается периодически пересчитывать промышленные запасы нефти и газа, содержащиеся в подобных коллекторах, и в последующем по ним рассчитывать эффективную емкость для дальнейшего использования этих значений на аналогичных месторождениях [1].

На сегодняшний день по способам скважинной геофизики эффективно рассчитывается емкость коллекторов в изотропной среде. При наличии трещинной и каверновой пористости стандартные методы электрометрии оказываются нерезультативны даже для качественной интерпретации. Поэтому в сложном коллекторе с вторичной структурой порового пространства используется построение интерпретационной модели по комплексу следующих методов ГИС: нейтронных методов, акустического каротажа и гамма-гамма плотностной метод. В этом случае пористость пород и содержание в них отдельных минералов (кварца, доломита, ангидрита, кальцита и т.п.) находят решением системы линейных уравнений, связывающих показания отдельных методов ГИС с вышеперечисленными характеристиками. Например, для пород, представленных в изучаемом месторождении,

в минеральном скелете которых присутствуют известняк, доломит и ангидрит, что типично для многих карбонатных разрезов, система уравнений будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_{\text{п}} = \Delta T_{\text{дол}} \cdot V_{\text{дол}} + \Delta T_{\text{изв}} \cdot V_{\text{изв}} + \Delta T_{\text{анг}} \cdot V_{\text{анг}} + \Delta T_{\text{ж}} \cdot K_{\text{п}}; \\ K_{\text{п.п}} = \Delta K_{\text{п.п.дол}} \cdot V_{\text{дол}} + \Delta K_{\text{п.п.изв}} \cdot V_{\text{изв}} + \Delta K_{\text{п.п.анг}} \cdot V_{\text{анг}} + \Delta K_{\text{п.п.ж}} \cdot K_{\text{п}}; \\ \delta_{\text{п}} = \delta_{\text{дол}} \cdot V_{\text{дол}} + \delta_{\text{изв}} \cdot V_{\text{изв}} + \delta_{\text{анг}} \cdot V_{\text{анг}} + \delta_{\text{ж}} \cdot K_{\text{п}}; \\ 1 = V_{\text{дол}} + V_{\text{изв}} + V_{\text{анг}} + K_{\text{п}}; \end{array} \right. \quad (1)$$

где $V_{\text{дол}}$, $V_{\text{изв}}$, $V_{\text{анг}}$ — относительные объемы доломита, кальцита и ангидрита в породе; $\Delta T_{\text{дол}}$, $\Delta T_{\text{изв}}$, $\Delta T_{\text{анг}}$, $\Delta_{\text{дол}}$, $\Delta_{\text{изв}}$, $\Delta_{\text{анг}}$ — величины интервального времени и плотности в соответствующих минералах; $\Delta K_{\text{п.п}}$ — значения поправок в нейтронную пористость по отношению к известняку для соответствующего минерала; $\Delta T_{\text{ж}}$, $\Delta_{\text{ж}}$ и $\Delta K_{\text{п.п.ж}}$ — то же во флюиде, заполняющем поровое пространство [2].

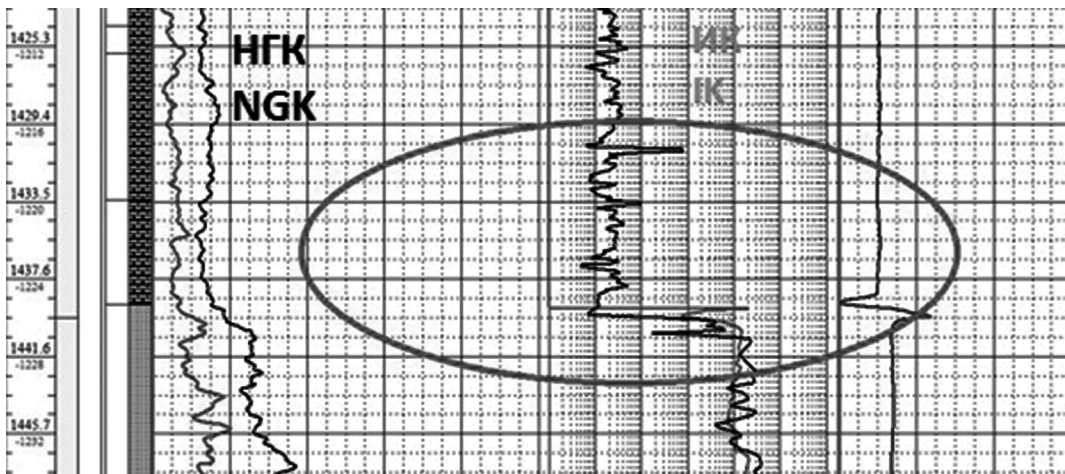


Рис. 1. Показания методов ГИС в интервале поглощений
[Fig. 1. Readings from well logging methods in the absorption interval]

В изучаемой скважине был проведен комплекс ГИС, включающий пару: АК-НМ. Данные по индукционному каротажу (ИК) в интервале поглощения 1400–1440 м абсолютно не информативны, в то время как по результатам нейтронного гамма-каротажа (НГК) можно выделить каждый пропласток. Метод бокового каротажного зондирования (БКЗ) также не отображает реальной картины в интервале поглощений (кривые разных градиент-зондов идут параллельно друг другу), в то время как по кривой акустического метода возможна качественная и количественная интерпретация.

Но даже когда известен вид коллектора, данная интерпретационная модель не всегда информативна, так как в ней не учитывается случайное распределение трещинной и каверновой пористости в реальной породе-коллекторе. Для этого используются М-Н плотности, которые строятся на основе имеющейся геологической информации о разрезе — выделяются основные породообразующие минералы и какой-либо геофизический параметр, подчеркнуто выраженный на графике. Не-

достатком графика М-N является в ряде случаев неоднозначный ответ об основных породообразующих минералах. Поэтому рекомендуется использовать зависимость параметра М от какого-либо геофизического параметра: $\Delta T_{\text{п}}$, $K_{\text{п.п}}$, $\Delta \rho$, $\alpha_{\text{сп}}$, ΔJ_{γ} и др. В таком случае породообразующие минералы определяются однозначно.

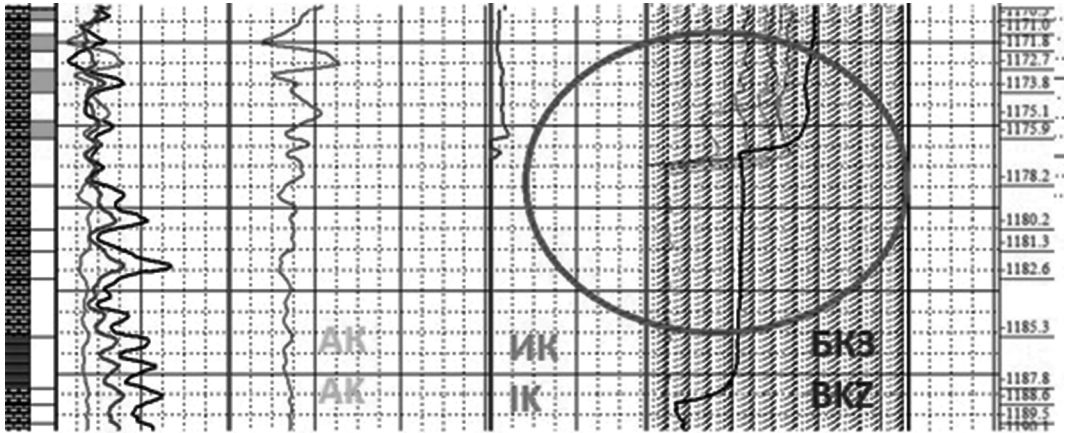


Рис. 2. Информативность методов БКЗ в интервале поглощений
[Fig. 2. Sensitivity of lateral logging sounding methods in the absorption interval]

Таблица

Ведомость поглощений в процессе строительства скважины
[Table. List of intakes during the construction of the well]

Интервал, м [Interval, m]	Дата, № рейса [Date Round №]	Объем поглощения, м ³ [Absorption Volume, m ³]	Интенсивность поглощения, м ³ /ч [Absorption intensity, m ³ /h]	Стратиграфия на забое [Stratigraphy on bottomhole]
1346—1356	29.07.2017, 4 Рейс [Round 4]	2	2	Башкирский ярус [Bashkirian stage]
1372—1421	30.07.2017, 4 Рейс [Round 4]	2—25	3—22	Серпуховский ярус [Serpukhovian stage]
1421—1425	31.07.2017, 5 Рейс [Round 5]	42—44	50	Серпуховский ярус [Serpukhovian stage]
1563—1567	25.08.2017, 15 Рейс [Round 15]	15—20	20—60	Визейский ярус Окский надгоризонт [Visean stage Oka superhorizon]
1567—1568	26.08.2017, 16 Рейс [Round 16]	38	70	Визейский ярус Окский надгоризонт [Visean stage Oka superhorizon]
1579—1586	29.08.2017, 18 Рейс [Round 18]	12—14	6—28	Визейский ярус Окский надгоризонт [Visean stage Oka superhorizon]
1606—1616	30.08.2017, 18 Рейс [Round 18]	12	3,5	Визейский ярус Окский надгоризонт [Visean stage Oka superhorizon]

В изучаемой скважине была построена интерпретационная модель и получены данные по проницаемости в интервале поглощений (0,7—14 мД). Данные по проницаемости занижены, так как по ведомости поглощений в рассматриваемом интервале 1400—1440 м зафиксирован наибольший объем поглощения. Таким образом, результаты расчета фильтрационно-емкостных свойств по системе уравнений (1) являются некорректными, интерпретационную модель необходимо дополнить М-Н плотами.

Результаты и обсуждение

Для ликвидации поглощения в начале были использованы стандартные методы: специальный глинистый буровой раствор (БР), далее пошла закачка резины, стекловолокна, кошмы и шерсти для того, чтобы закупорить трещины и поры. Но это не помогло, по-прежнему при промывке не был получен выход промывочной жидкости (ПЖ) на приемной емкости. Отметим, что наличие таких компонентов затрудняет отбор шлама, и если закачивать промывочную жидкость с резиной, стекловолокном и шерстью в продуктивные интервалы, то вся околоскважинная зона будет малоинформативна для последующих ГИС. После того как стандартные методы не дали эффекта, была использована новая разработка: закачка специального гелиевого раствора, который при взаимодействии с водой в течение небольшого времени после закачки в пласт кристаллизуется и переходит в стекловидное состояние. Это стекло, по сути, образовало пленку на стенке скважины, был получен выход ПЖ при промывке. Для того чтобы закрепить этот интервал, решили установить цементный мост (ЦМ). После ОЗЦ была собрана компоновка низа буровой колонны (КНБК) для разбурки ЦМ (рис. 3). В том месте, где предполагалось наличие цементного башмака, нет нагрузки на долото. При закачке тампонажного раствора давление превышало давление при промывке, и тампонажный раствор пробил эту стекловидную пленку и полностью «ушел» в пласт.

Снижения негативных факторов необходимо добиваться при помощи новейших технологий — одним из частных решений для перекрытия зон осложнений может быть профильный перекрыватель (рис. 4), разработанный институтом «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть».

Профильный перекрыватель (ПП) — это технология перекрытия осложненных зон стальными обсадными трубами увеличенного диаметра, «смятыми» до номинального диаметра в поглощающей скважине. Протяженность перекрытия соответствует необходимому интервалу перекрытия, т.е. соразмерна зоне осложнения. Также нет необходимости цементирования, и сохраняется исходный диаметр скважины [3].

Профильный перекрыватель изготавливается из обсадных труб увеличенного диаметра нестандартным способом. С помощью расширителя до установки ПП зону осложнения расширяют до диаметра, который соответствует диаметру обсадных труб до профилирования. На буровой колонне ПП спускают в скважину до интервала поглощений. Поворотом ротора отворачивают буровую колонну от перекрывателя и закачивают буровой раствор с созданием внутреннего

давления, для того чтобы расширить ПП до плотного прижатия к стенкам расширенного интервала скважины. Чтобы окончательно выровнять складки перекрывателя и откалибровать его диаметр, осуществляют развальцовку с помощью пятироликового развальцевателя. Также возможен процесс одновременного бурения с расширением скважины, что позволяет сократить время на изоляцию предполагаемых зон поглощений [4].

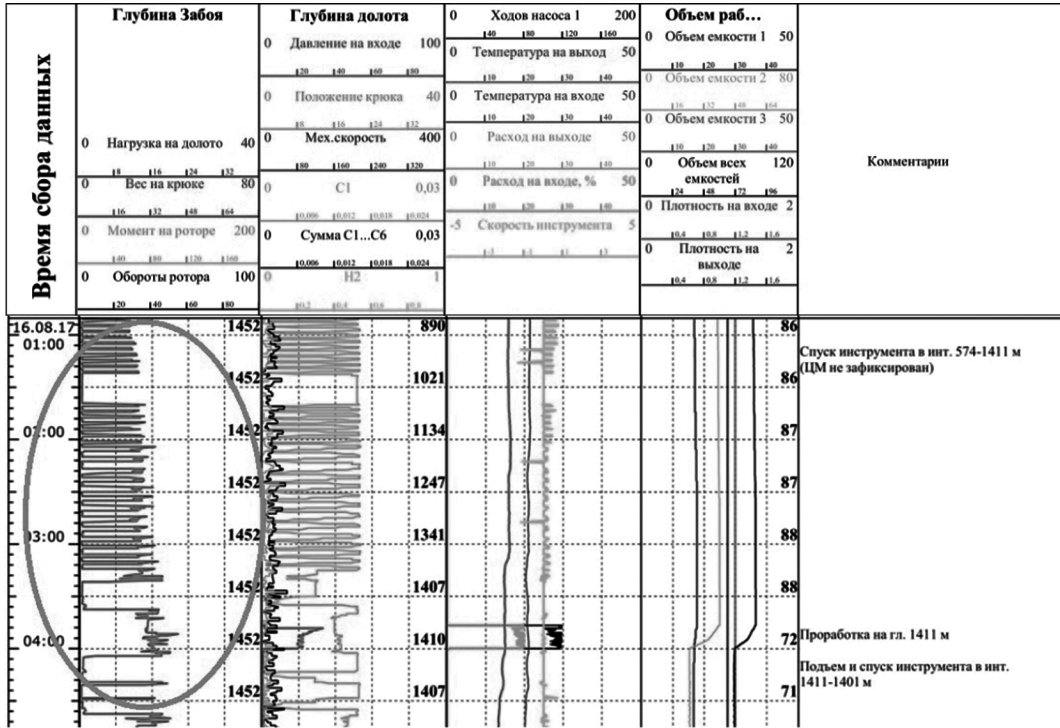


Рис. 3. Спуск КНБК для разбурки цементного башмака
 [Fig. 3. Descent of BHA for drilling the casing shoe]

Расширители как один из важнейших элементов комплекса оборудования технологии локального крепления скважины ПП можно использовать и во время бурения, т.е. производить расширение ствола скважины одновременно при проходке скважины. Это особенно актуально, так как расширители по своим техническим характеристикам не уступают бурильным долотам.

Опыт применения шарошечных расширителей РРМ 216/240 на изучаемой скважине, предназначенных для увеличения диаметра скважин с 215,9 до 237 мм роторным способом, показал, что расширение осуществляется с механической скоростью 3–9 м/ч, а проходка на один спуск бурового инструмента составляет 50–70 м в зависимости от крепости пород. Плашки новых расширителей оснащены двумя типами породоразрушающих элементов — это резцы, армированные синтетическими алмазами (PDC), и зубки из твердого сплава. Основным отличием данной конструкции плашек является то, что каждый резец продублирован дополнительным твердосплавным элементом — «импрегом» [5].

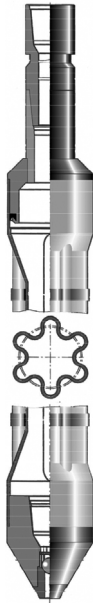


Рис. 4. Перекрыватель ОЛКС-295
[**Fig. 4.** Profile packer OLKS-295]

Источник: Патент РФ на изобретение № 2172387 Профильный перекрыватель ОЛКС-295

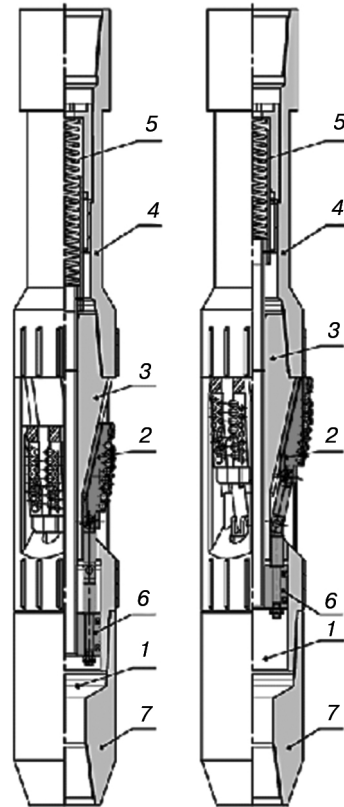


Рис. 5. Расширитель раздвижной PPM 216/240:
а — в транспортном положении; б — в рабочем положении:
1 — гидрокамера; 2 — плашка с резцами PDC; 3 — корпус;
4 — верхний переводник; 5 — пружина; 6 — поршень;
7 — нижний переводник

[**Fig. 5.** Underreamer PPM 216/240: а — in transport position;
б — in working position: 1 — hydrocamera; 2 — die with PDC cutters; 3 — body; 4 — upper sub; 5 — spring; 6 — piston; 7 — lower sub]

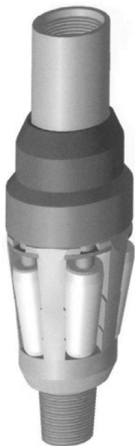


Рис. 6. Пятироликовый развальцеватель PP230/300
[**Fig. 6.** Five-roller underreamer PP230/300]

Источник: Патент РФ на изобретение № 2172387 Профильный перекрыватель ОЛКС-295

Применяются ПП не только в наклонно направленных скважинах, но и в горизонтальных, что особенно актуально для месторождений, находящихся на шельфе (где преобладают горизонтальные скважины или многозабойные с горизонтальным окончанием). Помимо ликвидации зон поглощения перекрыватели имеют возможность [6]:

- разобщить водоносные пласты от продуктивных до спуска эксплуатационной колонны;
- разобщить отдельные участки горизонтальной скважины;

- последовательно локально перекрывать зоны осложнений по мере их вскрытия;
- исключить из конструкции скважины промежуточные колонны.

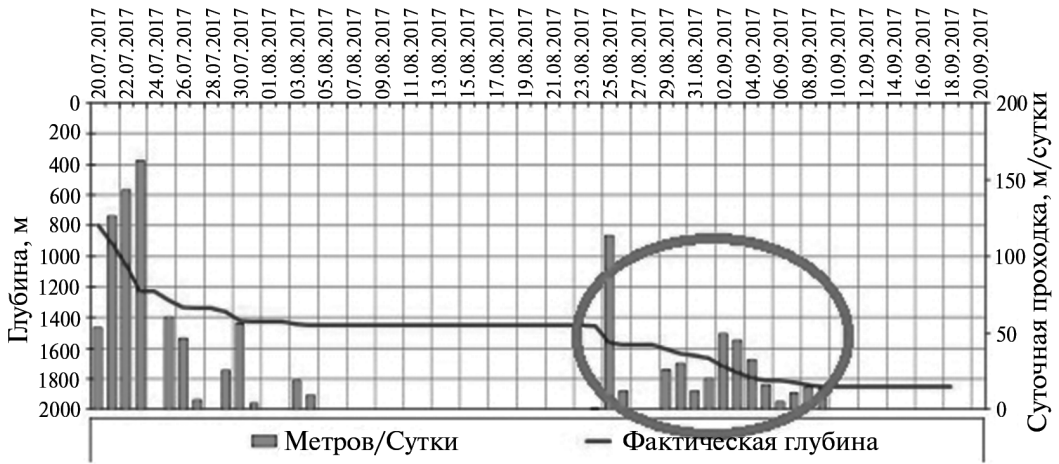


Рис. 7. График строительства скважин
[Fig. 7. Schedule of well construction]

Использование стандартных методов в изучаемой скважине заняло около 20 дней, т.е. скважина простаивала длительный период, после установки ПП (срок установки менее суток) началась проходка скважины.

Заключение

Рекомендуется использовать прогнозирование зон трещиноватости на этапе геолого-разведочных работ с помощью моделирования превалирующей вторичной пористости и в дальнейшем использовать бурение таких интервалов с одновременным применением расширителя, чтобы сократить время строительства скважин и предупредить аварийные ситуации при бурении.

Таким образом, в сложных коллекторах необходимо построение точной интерпретационной модели по данным геологии, петрофизики и ГИС, т.е. в карбонатных разрезах с развитой вторичной пористостью необходим более комплексный подход для оценки ФЕС.

Необходимо прогнозировать возможные зоны поглощения. Прогнозирование размещения сложных видов коллекторов с превалирующей вторичной емкостью основано на их моделировании. Принципиальной моделью в данном случае является та, в которой главная роль в пористости коллектора принадлежит межзерновой среде (блоки пород, рассеченные трещинами). Для целей прогнозирования факторов распределения в пространстве коллекторов и их физических и коллекторных свойств успешно применяются карты зональности постседиментационных изменений.

В зонах возможных сильных поглощений рекомендуется использовать бурение с одновременным расширением ствола скважины, что еще больше сократит время на установку ПП и будет менее затратно, чем использование стандартных методов ликвидации сильных поглощений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Вендельштейн Б.Ю., Резванов Р.А. Геофизические методы определения параметров нефтегазовых коллекторов. М.: Недра, 1978. 316 с.
- [2] Смехов Е.М., Дорофеева Т.В. Вторичная пористость горных пород—коллекторов нефти и газа. СПб.: Недра, 1987. 96 с.
- [3] Абдрахманов Г.С., Хамитьянов Н.Х. и др. Патент РФ на изобретение № 2491405. Расширитель скважин; опубл. 27.11.09.
- [4] Абдрахманов Г.С., Ибрагимов Н.Г. и др. Патент РФ на изобретение № 2374424. Способ и устройство изоляции зон осложнения бурения скважины профильным перекрывателем с цилиндрическими участками; опубл. 2009 г.
- [5] Гуськов И.В., Вакула А.Я., Филиппов В.П., Кишин А.В., Пронин В.Е., Максимов Д.В., Мухаммадеев И.Р., Тимкин Н.Я. Новая технология и инструменты для разобщения пластов профильными перекрывателями // Бурение и нефть. 2014. № 6. URL: <http://burneft.ru/archive/issues/2014-06/8> (дата обращения: 29.04.2018).
- [6] Тимкин Н.Я. Ликвидация катастрофических поглощений с применением оборудования локального крепления скважин (ОЛКС-295С) при строительстве скважины № 71 Ковыктинского месторождения // Бурение и нефть. 2016. № 2. С. 36—37. URL: <https://burneft.ru/archive/issues/2016-02/36> (дата обращения: 29.04. 2018).

© Исайчева Е.Г., Фаттахов Л.Р., Абдулкеримов Р.Ф., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 02 июня 2018

Дата принятия к печати: 25 июля 2018

Для цитирования:

Исайчева Е.Г., Фаттахов Л.Р., Абдулкеримов Р.Ф. Решение геолого-технологических задач в карбонатных разрезах с развитой вторичной емкостью на примере месторождения Волго-Уральской нефтегазоносной провинции // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 3. С. 391—401. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-391-401

Сведения об авторах:

Исайчева Елена Георгиевна — старший преподаватель департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* геологическое моделирование, петрофизика, интерпретация ГИС сложных коллекторов, подсчет запасов месторождений. *Контактная информация:* e-mail: isaycheva_eg@pfur.ru

Фаттахов Ленар Рустамович — магистрант департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* разработка методик интерпретации ГИС, подсчет запасов месторождений. *Контактная информация:* e-mail: fattakhovlr.adn@gmail.com

Абдулкеримов Ренат Фаикович — магистрант департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* разработка методик интерпретации ГИС, подсчет запасов месторождений. *Контактная информация:* e-mail: renat.abdulkеримov@yandex.ru

Solution for geological and technological problems in carbonate sections with developed secondary capacity on the example of Volga-Ural Petroleum and Gas Province deposit

E.G. Isaycheva, L.R. Fattakhov, R.F. Abdulkеримov

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

Abstract. As of today many of the old fields are already depleted. Replenishment of the category of oil and gas reserves from the category of prospective resources proceeds mainly due to revising the state of over- or underlying layers in the already developed horizon, rather than by exploiting entirely new deposits. Current methods of allocation of complex reservoirs both according to the data of geological and technological studies and the results of commercial and geophysical studies are relevant. In this paper, solutions of geological and technological problems are considered on the example of the carbonate section of the Volga-Ural Petroleum and Gas Province in absorbing wells. Today, by the methods of borehole geophysics, reservoirs capacity in isotropic environment is effectively calculated. In the presence of fracture and cavity porosity, the standard methods of electrometry prove to be ineffective, even for a qualitative interpretation. Therefore, in the complex reservoir with a secondary porosity space structure, construction of interpretation model is used by the following methods of well logging — neutron method (NM), acoustic method (AK) and gamma-gamma density method (GGM-P). To eliminate absorptions, both standard methods and the latest developments were used. The effectiveness of the use of profile packers in absorbing wells is shown.

Key words: secondary porosity, complex reservoir, profile packer, interpretation model, drilling

REFERENCES

- [1] Wendelshtein B.A., Rezvanov R.A. *Geofizicheskie metody opredeleniya parametrov neftegazovykh kollektorov* [Geophysical methods for determining the parameters of oil and gas reservoirs]. Moscow: Nedra Publ., 1978. (In Russ.)
- [2] Smekhov E.M., Dorofeeva T.V. *Vtorichnaya poristost' gornykh porod-kollektorov nefti i gaza* [Secondary porosity of oil and gas rock reservoirs]. St. Petersburg: Nedra Publ., 1987. 96 p. (In Russ.)
- [3] Abdrakhmanov G.S., Khamityanov N. Patent RUS № 2491405. *Rasshiritel' skvazhin* [Hole reamer]. Publ., 2009. (In Russ.)
- [4] Abdrakhmanov G.S., Ibragimov N.G. Patent RUS № 2374424. *Sposob i ustroystvo izolyatsii zon oslozhneniya bureniya skvazhiny profil'nym perekryvatelem s tsilindricheskimi uchastkami* [A method and device for isolating the zones of complicated drilling of a well by a profile packer with cylindrical sections]. Publ., 2009. (In Russ.)
- [5] Gus'kov I., Vakula A., Filippov V., Kirshin A., Pronin V., Maximov D., Mukhamadeev I., Timkin N. New technology and instruments for formation isolation by profiling packers. *Burenie i nef't' [Drilling and oil]*. 2014. No. 6. Available at: <http://burneft.ru/archive/issues/2014-06/8> (accessed 04.29.2018). (In Russ.)
- [6] Timkin N. Liquidation of disastrous acquisitions with the use of equipment local well casing (OLKS-295C) during construction of the well No. 71 of Kovykta field. *Burenie i nef't' [Drilling and oil]*. 2016. No. 2. P. 36—37. Available at: <https://burneft.ru/archive/issues/2016-02/36> (accessed 04.29.2018). (In Russ.)

Article history:

Received: June 02, 2018

Accepted: July 25, 2018

For citation:

Isaycheva E.G., Fattakhov L.R., Abdulkerimov R.F. (2018) Solution for geological and technological problems in carbonate sections with developed secondary capacity on the example of Volga-Ural Petroleum and Gas Province deposit. *Journal of Engineering Researches*, 19(3), 391–401. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-3-391-401

Bio Note:

Elena G. Isaycheva — Senior lecturer of the Department of Geology, Mining and Oil and Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* geological modeling, petrophysics, complex-reservoir well-log interpretation, field reserves evaluation. *Contact information:* e-mail: isaycheva_eg@pfur.ru

Lenar R. Fattakhov — Master student of the Department of Geology, Mining and Oil and Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* well log interpretation methods development, field reserves evaluation. *Contact information:* e-mail: fattakhovlr.adn@gmail.com

Renat F. Abdulkerimov — Master student of the Department of Geology, Mining and Oil and Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* well log interpretation methods development, field reserves evaluation. *Contact information:* e-mail: renat.abdulkerimov@yandex.ru

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»

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

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

ПВ	место	литер

на журнал

(индекс издания)

ВЕСТНИК РУДН

Серия _____

Стоимость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	<input type="text"/>
	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)