



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

Том 21 № 1 (2020)

DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-1

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

Научный журнал

Издается с 2000 г.

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

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

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

Резник Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет имени 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 имени Н.Э. Баумана

Коноплев 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

Мальшиев 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 имени 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 Бейра Интериор, Португалия

Грациани Филиппо – профессор Римского университета «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, Уэст-Лафайетт, США

Ясика Тетсуо – почетный профессор, Университет Кюсю, Япония

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

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

Периодичность 4 выпуска в год.

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

Языки: русский, английский.

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18230.

Цель и тематика

В журнале публикуются результаты фундаментальных и прикладных научных исследований российских и зарубежных ученых в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения и машиноведения, наук о земле. Цель журнала заключается в содействии развитию отечественных инженерных школ, продвижению и внедрению в практику современных перспективных исследований в указанных областях.

Научный журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» адресован научным работникам, инженерам, аспирантам, студентам старших курсов технических вузов. Включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК при Минобрнауки России. 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 *Ю.А. Заикина*
Компьютерная верстка: *Ю.А. Заикина*

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

Адрес редакционной коллегии журнала «Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования»:
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Подписано в печать 05.08.2020. Выход в свет 12.08.2020. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 11,62. Тираж 500 экз. Заказ № 1. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов»
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

Volume 21 Number 1 (2020)

DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-1

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

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia

Editor-in-Chief

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

Associate Editor-in-Chief

Sergey V. Reznik – Professor, Head of the Department “Rocket and Space Composite Structures”, Bauman Moscow State Technical University

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 (RUDN University)

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 (RUDN University)

Askhat I. Diveev – Professor, Head of the Sector of Problems of Cybernetics of Federal Research Center “Informatics and Control”, Russian Academy of Sciences

Valery N. Zaharov – Professor, Director of the Institute for Problems of Integrated Development of the Subsurface, 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 (RUDN University)

Anna V. Kornilova – Associate Professor, Professor of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

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, 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

Arun Misra – Professor, McGill University, Canada

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

David Spencer – Professor, Penn State University, USA

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

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

Tetsuo Yasaka – Professor Emeritus, Kyushu University, Japan

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

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

Published 4 times a year.

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

Languages: Russian, English.

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

Aims 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 field of aerospace engineering, mechanical engineering and machine science, Earth science. The purpose of the journal is to contribute the development of Russian engineering schools, promotion and implementation of modern promising research projects in these areas.

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).

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

Address of the editorial board:

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

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

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

Printing run 500 copies. Open price.

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

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Вальехо Мальдонадо П.Р., Романова В.А., Кампуш М.Ж.А.** Автоматизированное проектирование профиля насоса с эпициклоидальным зацеплением с использованием средств MathCad 7
- Асоян А.Р., Данилов И.К., Асоян И.А., Полищук Г.М.** Применение водорода в двигателях внутреннего сгорания 14
- Камардина Н.В., Гусейнов Р.М., Данилов И.К., Коноплёв В.Н., Иванов К.А., Жарко А.С., Полищук Г.М.** Топологическая оптимизация детали «Серьга» 20
- Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Шкарин К.В., Барыбина А.С., Огнева Я.А., Морозов П.Д.** Моделирование эффективного решения утилизации вторичных энергоресурсов ПГУ на примере ПГУ-420Т 27

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Панкратов Н.С., Белов В.В.** Выбор площадок для строительства пунктов захоронения радиоактивных отходов 36
- Котельников А.Е., Колмакова Д.А., Котельникова Е.М.** Определение последовательности образования медно-никелевых руд месторождения Кун-Манье (Амурская область) 48
- Есина Е.Н., Лиходеевская В.В.** Развитие методов уравнивания нивелирных сетей 58
- Агеев Ш.Р., Дружинин Е.Ю., Камалетдинов Р.С.** Перспективы добычи вязкой жидкости установками скважинных электроприводных лопастных насосов (УЭЛН) 66

СТРОИТЕЛЬСТВО

- Гришин Г.Е., Тихонов Г.И., Окольников Г.Э.** Обзор высокопрочной винтовой арматуры, применяемой в предварительно напряженных конструкциях 81
- Новиков Н.В., Самченко С.В., Окольников Г.Э.** Баритсодержащие радиационно-защитные строительные материалы 94

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

- Vallejo Maldonado P.R., Romanova V.A., Campos M.J.A.** Computer-aided design of the pump profile with epicycloidal gearing using MathCad tools 7
- Asoyan A.R., Danilov I.K., Asoyan I.A., Polishchuk G.M.** Hydrogen application in internal combustion engines 14
- Kamardina N.V., Guseynov R.M., Danilov I.K., Konoplev V.N., Ivanov K.A., Zharko A.S., Polishchuk G.M.** Topological optimization of the “Earring” element 20
- Antipov Yu.A., Shatalov I.K., Shkarin K.V., Barybina A.S., Ogneva Ya.A., Morozov P.D.** Modeling an effective method to utilize secondary energy resources of a combined cycle gas turbine based on the CCGT-420T 27

EARTH SCIENCE

- Pankratov N.S., Belov V.V.** Selection of sites for the construction of radioactive waste disposal points 36
- Kotelnikov A.E., Kolmakova D.A., Kotelnikova E.M.** Determination of the copper-nickel ores formation sequence of the Kun-Manye deposit (Amur region) 48
- Esina E.N., Likhodeevskaya V.V.** Development of methods for equalizing level networks 58
- Ageyev Sh.R., Druzhinin E.Yu., Kamaletdinov R.S.** Prospects for production of viscous fluid by electric shaft-driven vane pumps (ESP) 66

CIVIL ENGINEERING (CONSTRUCTION)

- Grishin G.E., Tikhonov G.I., Okolnikova G.E.** Overview of high-strength screw thread reinforcement used in pre-stressed structures 81
- Novikov N.V., Samchenko S.V., Okolnikova G.E.** Barite-containing radiation protective building materials 94



МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-7-13

УДК 621.43.31.365

Научная статья

Автоматизированное проектирование профиля насоса с эпициклоидальным зацеплением с использованием средств MathCad

П.Р. Вальехо Мальдонадо, В.А. Романова, М.Ж.А. Кампуш

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 10 апреля 2020 г.

Доработана: 21 апреля 2020 г.

Принята к публикации: 22 апреля 2020 г.

Ключевые слова:

подшипник скольжения, тепловой баланс, эксцентриситет, масляный насос, эпициклоидальное зацепление

В статье рассматривается способ определения относительного эксцентриситета χ , используемого при расчете теплового баланса подшипника скольжения двигателя внутреннего сгорания (ДВС). При проведении указанного расчета задается ряд значений температур в масляном слое подшипника. Для каждой заданной температуры определяется величина вязкости моторного масла μ и коэффициент нагруженности подшипника Φ . Для определения относительного эксцентриситета в качестве исходных данных используются графические зависимости коэффициента нагруженности от относительного эксцентриситета. Тепловой расчет подшипника скольжения показал, что имеет большое значение точность определения величины относительного эксцентриситета χ . Ее неточное определение приводит к невыполнению теплового баланса в подшипнике. Кроме того, способ определения величины χ по принятому значению отношения рабочей длины подшипника к диаметру шатунной шейки коленчатого вала (графическим способом) для проведения указанного расчета достаточно трудоемкий. По этой причине графический способ определения χ был заменен на аналитический. Относительные эксцентриситеты получены с использованием метода наименьших квадратов. Разработан алгоритм для автоматизированного построения поперечного и продольного профилей масляного насоса с эпициклоидальным зацеплением.

Введение

Для снижения затрат мощности на преодоление трения между шейками коленчатого вала и подшипниками скольжения, а также для уменьшения

нагрева и износа подшипников скольжения при работе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на любых скоростных и нагрузочных режимах необходимо обеспечить надежную смазку.

Нормальная работоспособность подшипников скольжения достигается при непрерывном подводе масла под давлением для поддержания режима жидкостной смазки и отводе теплоты, выделяющейся при трении пары «шейка – подшипник». При этом поддерживается тепловой баланс между теплотой, выделяющейся при трении ($Q_{тр}$), и теплотой, которая отводится в масло, циркулирующее через подшипник ($Q_{отв}$) [1–5].

Вальехо Мальдонадо Пабло Рамон, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук, prvm@rambler.ru

Романова Викторина Анатольевна, доцент департамента строительства Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук.

Кампуш Мессиаш Де Жезуш Аугушту, студент магистратуры департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

© Вальехо Мальдонадо П.Р., Романова В.А., Кампуш М.Ж.А., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Для определения основных конструкционных параметров [1; 2] масляного насоса с эпициклоидальным зацеплением необходимо знать циркуляционный расход масла через ДВС. С учетом того, что половина расхода масла, поданного насосом [3; 6–8], циркулирует через коренные и шатунные подшипники, большое внимание уделяют тепловому расчету подшипника скольжения [1; 2; 9–11].

1. Определение относительного эксцентриситета

Коэффициент нагруженности (Φ) подшипника скольжения характеризует положение шейки вала внутри подшипника и определяется из выражения

$$\Phi = \frac{q_{\text{ср}} \cdot \Psi^2}{\mu \cdot \omega}, \quad (1)$$

где $q_{\text{ср}} = \frac{R_{\text{шш.ср}}}{d_{\text{шш}} \cdot L_{\text{п}}}$ – среднее удельное давление на опорную поверхность подшипника скольжения; $d_{\text{шш}}$ – диаметр шатунной шейки; $L_{\text{п}}$ – рабочая длина подшипника; $R_{\text{шш.ср}}$ – средняя результирующая сила (рис. 1); $\Psi = \frac{d_{\text{п}} - d_{\text{шш}}}{d_{\text{шш}}}$ – относительный диаметральный зазор; $d_{\text{п}}$ – внутренний

диаметр подшипника; μ – динамическая вязкость масла; ω – угловая скорость вращения коленчатого вала.

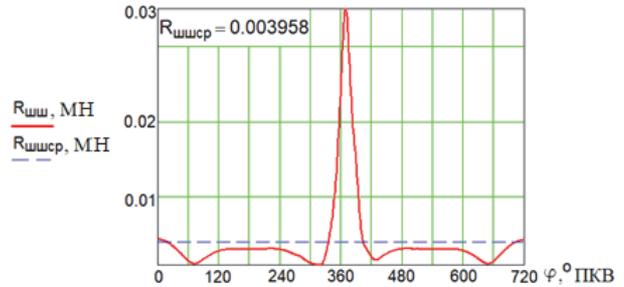


Рис. 1. Диаграмма нагрузки на шатунную шейку в прямоугольных координатах для дизеля 1С 8,0/7,5 [12–14]
[Figure 1.] Diagram of the load on the connecting rod neck in rectangular coordinates for single cylinder four stroke diesel, $D = 8,0$ cm, $S = 7,5$ cm [12–14]

При проведении теплового расчета подшипника скольжения задается несколько значений температуры в масляном слое в диапазоне от 80 до 115 °С [15]. Для каждой заданной температуры определяется значение вязкости масла [1; 2; 15]. После определения коэффициентов нагруженности подшипников (1) и используя графики, приведенные на рис. 2 [1; 2], находят относительные эксцентриситеты (χ) по принятому значению отношения $L_{\text{п}} / d_{\text{шш}}$.

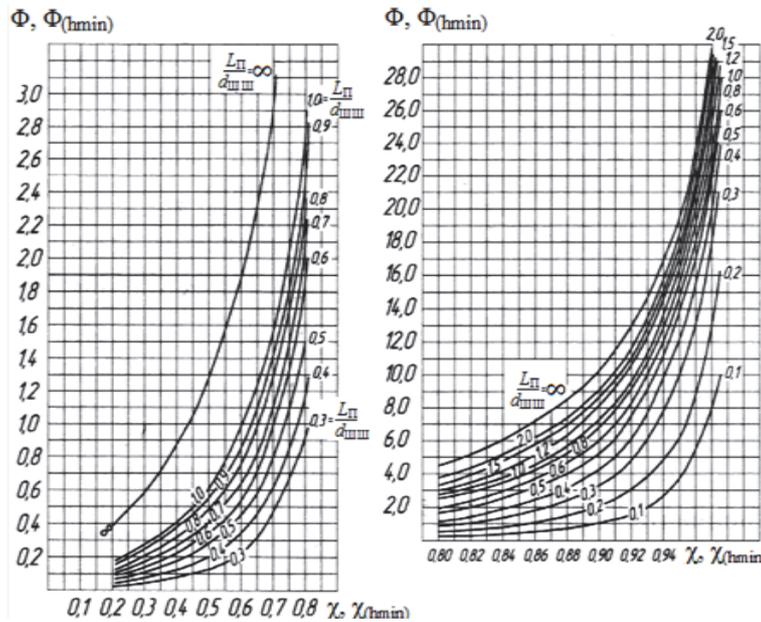


Рис. 2. Зависимость коэффициента нагруженности подшипников скольжения от относительного эксцентриситета [2]
[Figure 2.] Dependence of the load coefficient of plain bearings on the relative eccentricity [2]

С полученными значениями χ определяется температура равновесия, при которой теплота, выделяемая в подшипнике $Q_{Тр}$, равна теплоте $Q_{Овт}$, отводимой от него:

$$Q_{Тр} = Q_{Овт}.$$

Количество теплоты, которое выделяется в подшипнике в результате трения:

$$Q_{Тр} = \frac{\mu \cdot \omega^2 \cdot d_{шш} \cdot L_{П} \cdot C_{соп}}{2\Psi}, \quad (2)$$

где $C_{соп} = \frac{\pi}{\sqrt{1-\chi^2}} + 0,438 \cdot \chi \cdot \Phi \cdot \sqrt{1-\chi^2}$ – ко-

эффициент сопротивления при вращении шейки коленчатого вала [2].

Количество теплоты, отводимое от подшипника с маслом:

$$Q_{Овт} = C_M \cdot \rho_M \cdot V_M \cdot (T_{Вых} - T_{Вх}), \quad (3)$$

где C_M и ρ_M – теплоемкость и плотность моторного масла соответственно; V_M – полный расход масла, прокачиваемый через подшипник и определяемый как сумма расходов для нагруженной и ненагруженной зон подшипника соответственно; $T_{Вых}$ и $T_{Вх}$ – температура на выходе и на входе подшипника соответственно.

В табл. 1 представлены результаты вычисления теплового расчета для дизеля 1Ч 8,0/7,5 при применении моторного масла марки М-16-Г_{2(к)}.

Таблица 1

Результаты вычисления теплового расчета подшипника для дизеля одноцилиндрового 1Ч 8,0/7,5
[Table 1. Thermal calculation of the bearing results for single-cylinder diesel 1Ч 8,0/7,5]

	$T_{M1} = 90^\circ\text{C}$	$T_{M2} = 100^\circ\text{C}$	$T_{M3} = 110^\circ\text{C}$
μ_m , МПа·с	$1,362 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$0,769 \cdot 10^{-8}$
ρ_m , кг/м ³	839,6	834,1	828,7
Φ при $\Psi = 0,98 \cdot 10^{-3}$	1,058	1,44	1,873
χ при $L_n/d_{шш} = 0,5$	0,732	0,771	0,801
V_M , м ³ /с	$1,782 \cdot 10^{-6}$	$2,019 \cdot 10^{-6}$	$2,272 \cdot 10^{-6}$
$Q_{Тр}$, кДж/с	0,107	0,085	0,071
$Q_{Овт}$, кДж/с	0,038	0,08	0,132

Если искомые численные значения параметров работы подшипника скольжения обеспечивают его тепловой баланс, то действительная средняя температура в масляном слое будет соответствовать температуре ($T_{Мср}$ °С) в точке пересечения кривых $Q_{Тр}$ и $Q_{Овт}$ (рис. 3).

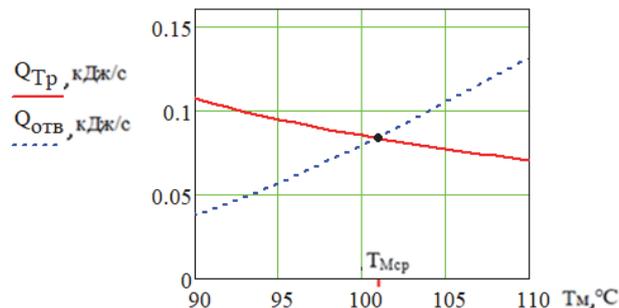


Рис. 3. График теплового баланса шатунного подшипника скольжения дизеля 1Ч 8,0/7,5
[Figure 3. Graph of the heat balance of the connecting rod bearing of single cylinder four stroke diesel, $D = 8,0$ cm, $S = 7,5$ cm]

Тепловой расчет подшипника скольжения показал, что имеет большое значение определение величин χ . Их неточное определение приводит к невыполнению теплового баланса в подшипнике. Кроме того, нахождение значения χ по принятому значению $L_n/d_{шш}$ (графическим способом) для проведения указанного расчета достаточно трудоемко. По этим причинам графический способ нахождения значения χ целесообразно заменить на аналитический.

Таблица 2

Зависимости для определения относительного эксцентриситета от коэффициента нагруженности подшипника скольжения при различных величинах отношения рабочей длины подшипника к диаметру шатунной шейки
[Table 2. Dependencies for determining relative eccentricity off the payload factor slide bearings at different ratios of the working length of the bearing to the diameter]

$L_n/d_{шш}$	0,3	0,4	0,5
χ	$-0,532\Phi^{-0,198} + 1,312$	$-0,477\Phi^{-0,252} + 1,226$	$-0,408\Phi^{-0,328} + 1,312$
$L_n/d_{шш}$	0,6	0,7	0,8
χ	$-0,466\Phi^{-0,312} + 1,175$	$-0,499\Phi^{-0,313} + 1,175$	$-0,555\Phi^{-0,302} + 1,206$
$L_n/d_{шш}$	0,9	1,0	
χ	$-0,555\Phi^{-0,329} + 1,187$	$-0,614\Phi^{-0,309} + 1,225$	

Относительные эксцентриситеты χ были получены с использованием метода наименьших квадратов [16] с учетом связи между Φ и χ , представленной на рис. 1, для различной величины отношения $L_{\pi}/d_{\text{шш}}$. Это позволило уменьшить погрешности при расчете и автоматизировать его, результаты приведены в табл. 2.

2. Построение поперечного и продольного профилей масляного насоса с эпициклоидальным зацеплением

Проведен расчет и выполнено построение продольного и поперечного профилей масляного насоса с эпициклоидальным зацеплением (рис. 4) [17; 18] с помощью пакета MathCad.

Принято, что d_{a1}, d_{a2} – диаметры окружностей внешней (ведущей) и наружной (ведомой) шестерен; e_1 – эксцентриситет; z_1, z_2 – числа зубьев внутренней (ведущей) и внешней (ведомой) шестерен; $r_{\text{кн}}, r_{\text{в}}$ – радиусы полукругов зубьев ведомой и ведущей шестерен; k – корректирующий коэффициент; θ – корректирующий угол; M'' , $M_{\text{н}}''$, φ, φ' – координаты продольного профиля ведомой шестерни; $M_{\text{в}}''$, $M_{\text{вн}}''$, $\varphi_{\text{в}}, \varphi_{\text{в}}'$ – координаты продольного профиля ведущей шестерни; $D_{\text{н}}''$, $D_{\text{кв}}''$ – наружные диаметры окружностей ведомой и ведущей шестерен; b' – длина зуба шестерни.

Текущие значения координат профиля зубьев ведомой шестерни определяются следующими уравнениями в параметрическом виде (мм):

$$x(\varphi) := \begin{bmatrix} \frac{d_{a2}}{2} \cdot \cos(\varphi) + e_1 \cdot \cos[(z_2 + 1) \cdot \varphi] - \\ -r_{\text{кн}} \cdot \cos\left(\text{atan}\left(\frac{\sin(z_2 \cdot \varphi)}{k + \sin(2 \cdot z_2 \cdot \varphi)}\right) + \varphi\right) \end{bmatrix},$$

$$y(\varphi) := \begin{bmatrix} \frac{d_{a2}}{2} \cdot \sin(\varphi) + e_1 \cdot \sin[(z_2 + 1) \cdot \varphi] - \\ -r_{\text{кн}} \cdot \sin\left(\text{atan}\left(\frac{\sin(z_2 \cdot \varphi)}{k + \sin(2 \cdot z_2 \cdot \varphi)}\right) + \varphi\right) \end{bmatrix}.$$

Текущие значения координат профиля зубьев ведущей шестерни также определяются уравнениями в параметрическом виде (мм):

$$x'(\varphi) := \begin{bmatrix} \frac{d_{a1}}{2} \cdot \cos(\varphi + \theta) + e_1 \cdot \cos[(z_2 \cdot \varphi) + \theta] - \\ -r_{\text{в}} \cdot \cos\left[\text{atan}\left[\frac{\sin[(z_2 \cdot \varphi) + \theta]}{k + \cos[(z_2 \cdot \varphi) + \theta]}\right] \dots\right] + \\ + (\varphi + \theta) \end{bmatrix},$$

$$y'(\varphi) := \begin{bmatrix} \frac{d_{a1}}{2} \cdot \sin(\varphi + \theta) + e_1 \cdot \sin[(z_2 \cdot \varphi) + \theta] - \\ -r_{\text{в}} \cdot \sin\left[\text{atan}\left[\frac{\sin[(z_2 \cdot \varphi) + \theta]}{k + \cos[(z_2 \cdot \varphi) + \theta]}\right] \dots\right] + \\ + (\varphi + \theta) \end{bmatrix}.$$

Уравнения наружной окружности ведущей шестерни:

$$x_{\text{в}}(\varphi) := r_{\text{кв}} \cdot \sin(\varphi), \quad y_{\text{в}}(\varphi) := r_{\text{кв}} \cdot \cos(\varphi).$$

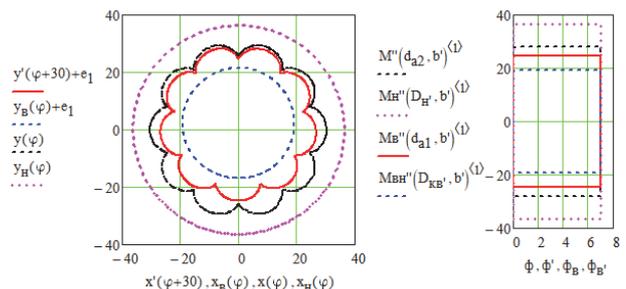


Рис. 4. Поперечный и продольный профили масляного насоса с эпициклоидальным зацеплением, полученные с помощью пакета MathCad, мм
Figure 4. Transverse and longitudinal profiles of the oil pump with epicycloidal engagement obtained using the MathCad package, mm

Заключение

Тепловой расчет подшипника скольжения показал, что большое значение имеет определение величин относительных эксцентриситетов. Их неточное определение приводит к невыполнению теплового баланса в подшипнике.

Аналитический метод позволяет быстрее и точнее определить относительный эксцентриситет.

Автоматизированное построение поперечного и продольного профилей масляного насоса с эпициклоидальным зацеплением с помощью пакета MathCad дает пользователю возможность на любом этапе проектирования изменить параметры, получить новые результаты, проанализировать их и выбрать оптимальное решение.

Список литературы

1. Луканин В.Н., Алексеев И.В. и др. Двигатели внутреннего сгорания: учебник: в 3 кн. Кн 2. Динамика и конструирование / под ред. В.Н. Луканина. М.: Высшая школа, 2007. 400 с.
2. Чайнов Н.Д., Краснокутский А.Н., Мяжков Л.Л. Конструирование и расчет поршневых двигателей: учебник для вузов / под ред. Н.Д. Чайнова. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2018. 536 с.
3. Тупей Н., Константиnescу В.Н., Ника Ал., Бицэ О. Подшипники скольжения: расчет, проектирование, смазка. Бухарест: Изд-во Акад. Рум. Нар. Респ., 1964. 457 с.
4. Вальехо Мальдонадо П.Р., Гришин Д.К. Расчет подшипников скольжения автотракторных двигателей: методическое пособие по выполнению курсового и дипломного проекта по курсу «Конструкция и расчет ДВС». М.: РУДН, 2007. 32 с.
5. Вальехо Мальдонадо П.Р., Гришин Д.К. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневого двигателя внутреннего сгорания: учебно-методическое пособие для выполнения практических и лабораторных работ. М.: МГТУ «МАМИ», 2011. 122 с.
6. Орлов П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. П.Н. Учаева. 3-е изд., испр. М.: Машиностроение, 1988. 544 с.
7. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. 4-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2008. 496 с.
8. Баширов Р.М. Автотракторные двигатели. Конструкция, основы теории и расчета: учебник для вузов. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2017. 335 с.
9. Вальехо Мальдонадо П.Р., Чайнов Н.Д. Кинематика и динамика автомобильных поршневых двигателей: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2020. 283 с. doi: 10.12737/989072.
10. Гусаров В.В. Динамика двигателей: уравнивание поршневых двигателей: учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2020. 131 с.

11. Андриенко Л.А., Байков Б.А., Ганулич И.К. и др. Детали машин: учебник для вузов / под ред. О.А. Ряховского. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2007. 520 с. (Серия «Механика в техническом университете». Т. 8).

12. Вальехо Мальдонадо П.Р., Руновский К.С. Автоматизированное построение теоретической диаграммы износа подшипника скольжения шатунной шейки коленчатого вала двигателя и определение средней нагрузки на шатунный подшипник за период максимальных давлений в нем (ПО «АПТИПОДСШ КВД»): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615126 от 17.05.2016 г.

13. Вальехо Мальдонадо П.Р., Краснокутский А.Н., Чайнов Н.Д. Автоматизированный расчет выносливости коренных шеек коленчатого вала по разрезной схеме: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616817 от 29.05.2019 г.

14. Вальехо Мальдонадо П.Р., Гришин Д.К. Автоматизация расчета износа шатунной шейки коленчатого вала четырехтактного рядного двигателя // Вестник машиностроения. 2009. № 6. С. 11–13.

15. Шатров М. Г., Алексеев И.В., Богданов С.Н. и др. Автомобильные двигатели: курсовое проектирование: учебное пособие для студентов учреждений высшего профессионального образования / под ред. М.Г. Шатрова. 2-е изд., испр. М.: Академия, 2012. 256 с.

16. Тактаров Н.Г. Справочник по высшей математике для студентов вузов. М.: Либроком, 2017. 880 с.

17. Бениович В.С., Апазиди Г.Д., Бойко А.М. Роторно-поршневые двигатели. М.: Машиностроение, 1968. 151 с.

18. Lai T.S. Design and machining of the epicycloid planetary gear of cycloid drives // Intern. J. Adv. Manuf. Tech. 2006. No. 28. Pp. 665–670.

Для цитирования

Вальехо Мальдонадо П.Р., Романова В.А., Кампуш М.Ж.А. Автоматизированное проектирование профиля насоса с эпициклоидальным зацеплением с использованием средств MathCad // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 7–13. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-7-13>

Computer-aided design of the pump profile with epicycloidal gearing using MathCad tools

Pablo Ramon Vallejo Maldonado, Viktorina A. Romanova, Messias de Jesus Augusto Campos

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

Article history:

Received: April 10, 2020

Revised: April 21, 2020

Accepted: April 22, 2020

Keywords:

plain bearings, thermal balance, eccentricity, oil pump, epicycloidal engagement

The article discusses a method for determining the relative eccentricity χ , used in calculating the thermal balance of an internal combustion engine sliding bearing. When performing this calculation, a number of temperature values are set in the bearing oil layer. For each set temperature, the engine oil viscosity value μ and the bearing load factor Φ are determined. To determine the relative eccentricity, graphical dependencies of the load factor on the relative eccentricity are used as input data. The thermal calculation of the sliding bearing showed that the accuracy of determining the relative eccentricity χ is of great importance. Their inaccurate definition leads to a failure of the thermal balance in the bearing. In addition, the method of determining the value of χ by the accepted value of the ratio of the working length of the bearing to the diameter of the connecting rod neck of the crankshaft (graphically) for this calculation is quite time-consuming. For this reason, the graphical method for determining χ has been replaced with an analytical one. Relative eccentricities were obtained using the least squares method. An algorithm has been developed for automated construction of transverse and longitudinal profiles of an oil pump with epicycloidal engagement.

References

1. Lukanin VN, Alekseev IV, et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engine]*: in 3 books. Book 2. *Dinamika i konstruirovaniye [Dynamics and designing]: textbook*. 2nd ed. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2007. (In Russ.)
2. Chajnov ND, Krasnokutskij AN, Mjagkov LL. *Konstruirovaniye i raschet porshnevnykh dvigatelej [Design and calculation of piston engines]*: textbook for universities. Moscow: MGTU imeni N.Je. Bauman Publ.; 2018. (In Russ.)
3. Tipej N, Konstantinesku VN, Nika AI, Bicje O. *Podshipniki skol'zheniya: raschet, proektirovaniye, smazka [Plain bearings: calculation, design, lubrication]*. Bucharest: Publishing house of Academy of the Romanian People's Republic; 1964.
4. Vallejo Maldonado PR, Grishin DK. *Raschet podshipnikov skol'zheniya avtotraktornykh dvigatelej [Calculation of sliding bearings of automotive engines]*: a guide to the implementation of the course and diploma project on the course "Design and Calculation of Internal Combustion Engines". Moscow: RUDN University Publ.; 2007. (In Russ.)
5. Vallejo Maldonado PR, Grishin DK. *Kinematika i dinamika krivoshipno-shatunnogo mehanizma porshneвого dvigatelja vnutrennego sgoraniya [Kinematics and dynamics of the crank mechanism of a piston internal combustion engine]*: a training manual for practical and laboratory work. Moscow: MGTU "MAMI" Publ.; 2011. (In Russ.)
6. Orlov PI. *Osnovy konstruirovaniya [Design basics]*: reference manual: in 2 books. Book 2. 3rd ed. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1988. (In Russ.)
7. Kolchin AI, Demidov VP. *Raschet avtomobil'nykh i traktornykh dvigatelej [Calculation of automobile and tractor engines]*. 4th ed. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2008. (In Russ.)
8. Bashirov RM. *Avtotraktornye dvigateli. Konstrukcija, osnovy teorii i rascheta [Automotive engines. Construction, fundamentals of theory and calculation]*: textbook for universities. 3rd ed. Saint Petersburg: Lan' Publ.; 2017. (In Russ.)
9. Vallejo Maldonado PR, Chajnov ND. *Kinematika i dinamika avtomobil'nykh porshnevnykh dvigatelej [Kinematics and dynamics of automobile piston engines]*: textbook. Moscow: INFRA-M Publ.; 2020. P. 283. doi: 10.12737/989072. (In Russ.)
10. Gusarov VV. *Dinamika dvigatelej: uravnoveshivaniye porshnevnykh dvigatelej [Engine dynamics: balancing]*

Pablo Ramon Vallejo Maldonado, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University, PhD, prvm@rambler.ru

Viktorina A. Romanova, Associate Professor of the Department of Construction of Engineering Academy of RUDN University, PhD.

Messias de Jesus Augusto Campos, master's degree student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University.

piston engines]: a textbook for universities. 2nd ed. Moscow: Jurajt Publ.; 2020. (In Russ.)

11. Andrienko LA, Bajkov BA, Ganulich IK, et al. *Detali mashin [Details of machines]*: textbook for universities. 3rd ed. Moscow: MGTU imeni N.Je. Baumana Publ.; 2007. (In Russ.)

12. Vallejo Maldonado PR, Runovskij KS. *Avtomatizirovanoe postroenie teoreticheskoy diagrammy iznosa podshipnika skol'zhenija shatunnoj shejki kolenchatogo vala dvigatelja i opredelenie srednej nagruzki na shatunnyj podshipnik za period maksimal'nyh davlenij v nem (PO "APTIPODSSH KVD")* [Automated construction of the theoretical diagram of the wear of the sliding bearing of the connecting rod journal of the crankshaft of the engine and determination of the average load on the connecting rod bearing for the period of maximum pressures in it (PO "APTIPODSSH KVD")]: certificate of state registration of the computer program No. 2016615126. May 17, 2016. (In Russ.)

13. Vallejo Maldonado PR, Krasnokutskij AN, Chajnov ND. *Avtomatizirovannyj raschet vynoslivosti korenyh sheek kolenchatogo vala po razreznoj sheme [Automated calculation of the endurance of the crankshaft main journals according to the split scheme]*: certificate of state registration of the computer program No. 2019616817. May 29, 2019. (In Russ.)

14. Vallejo Maldonado PR, Grishin DK. *Avtomatizacija rascheta iznosa shatunnoj shejki kolenchatogo vala chetyrehtaktnogo rjadnogo dvigatelja [Automation of the*

calculation of wear of the connecting rod neck of the crankshaft of a four-stroke inline engine]. *Vestnik mashinostroenija*. 2009;(6):11–13. (In Russ.)

15. Shatrov MG, Alekseev IV, Bogdanov SN, et al. *Avtomobil'nye dvigateli: kursovoe proektirovanie [Automotive engines: coursework design]*: a textbook for university students. 2nd ed. Moscow: Akademija Publ.; 2012. (In Russ.)

16. Taktarov NG. *Spravochnik po vysshej matematike dlja studentov vuzov [Handbook of higher mathematics for university students]*. Moscow: Librokom Publ.; 2017. (In Russ.)

17. Beniovich VS, Apazidi GD, Bojko AM. *Rotorno-porshnevye dvigateli [Rotary-piston engines]*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1968. (In Russ.)

18. Lai TS. Design and machining of the epicycloid planetary gear of cycloid drives. *Intern. J. Adv. Manufact. Tech.* 2006;28:665–670.

For citation

Vallejo Maldonado PR, Romanova VA, Campos MJA. Computer-aided design of the pump profile with epicycloidal gearing using MathCad tools. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):7–13. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-7-13> (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-14-19

УДК 629.113.004.67

Научная статья

Применение водорода в двигателях внутреннего сгорания

А.Р. Асоян

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64;
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

И.К. Данилов, И.А. Асоян, Г.М. Полищук

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 15 апреля 2020 г.

Доработана: 22 апреля 2020 г.

Принята к публикации: 30 апреля 2020 г.

Ключевые слова:

двигатели внутреннего сгорания, водород, ресурсосбережение нефтяных топлив, экологические показатели

Предложено техническое решение, способствующее снижению расхода основного углеводородного топлива, улучшению технико-экономических и экологических показателей двигателей внутреннего сгорания воздействием на процесс сгорания топливовоздушной смеси минимальной эффективной массовой долей добавки водорода в топливовоздушную смесь. Высокая скорость сгорания водородовоздушной смеси оказывает положительное влияние на повышение эффективности рабочего процесса. Воспламенение водорода происходит при достаточно широких пределах концентрации в воздухе. Пределы воспламенения: для водорода $\alpha = 0,15-10$; для бензина $\alpha = 0,27-1,7$; для метана $\alpha = 0,65-2,0$. Низкий предел воспламенения делает возможной работу двигателя на различных режимах с широким изменением состава смеси. Вопросы, связанные с аккумулярованием водорода на борту автомобиля, его хранением, взрывобезопасностью и многие другие, существенно тормозят развитие серийного производства автомобилей, работающих на водородном топливе. В связи с чем в качестве реальной альтернативы предложен метод применения малых добавок водорода в топливовоздушную смесь. Описанное техническое решение позволяет вырабатывать на борту автомобиля водород и без аккумулярования использовать его как добавку к основному топливу в двигателях внутреннего сгорания. Техническим результатом является снижение расхода углеводородного топлива (нефтяного происхождения) и повышение экологичности автомобиля вследствие снижения выброса вредных веществ в отработавших газах.

Введение

Вопросы ресурсосбережения топлив нефтяного происхождения и снижения вредных выбро-

сов в отработавших газах двигателей внутреннего сгорания (ДВС) актуальны и рассматривать их необходимо комплексно. Использование в ДВС экологически чистых топлив позволяет решать данные задачи.

Одним из таких топлив является водород, имеющий неограниченную сырьевую базу.

Общеизвестно, что коэффициент полезного действия двигателей внутреннего сгорания (особенно с искровым зажиганием) составляет около 30 %, а в городском режиме эксплуатации еще меньше. Использование водорода в качестве добавки к основному топливу позволяет снизить расход основного топлива и токсичность выпускных

Асоян Артур Рафикович, профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» МАДИ, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1976-9376>, asoyan.ar@mail.ru
Данилов Игорь Кеворкович, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7142-7461>.

Асоян Игорь Артурович, аспирант департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Полищук Георгий Максимович, профессор департамента механики и мехатроники Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор.

© Асоян А.Р., Данилов И.К., Асоян И.А., Полищук Г.М., 2020

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

газов за счет работы на более бедных смесях при качественном регулировании мощности.

Результаты исследований влияния водородовоздушной смеси на показатели CO, CH в выхлопных газах дизельного двигателя (рис. 1) [1] сви-

детельствуют о том, что содержание CO в отработавших газах двигателя, работающего на дизельном топливе с добавками водорода, снижается (рис. 1, а) и практически позволяют исключить эмиссию CH с отработавшими газами (рис. 1, б).

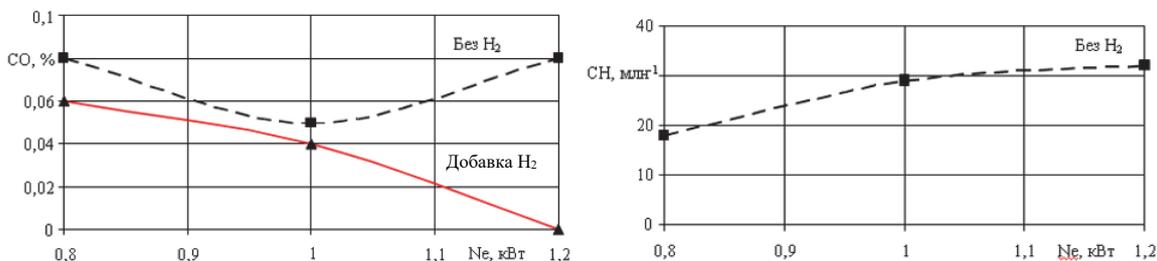


Рис. 1. Характеристики токсичности отработавших газов дизеля [1]:

---■--- работа на штатном топливе; —▲— работа на топливе с микродобавкой H₂

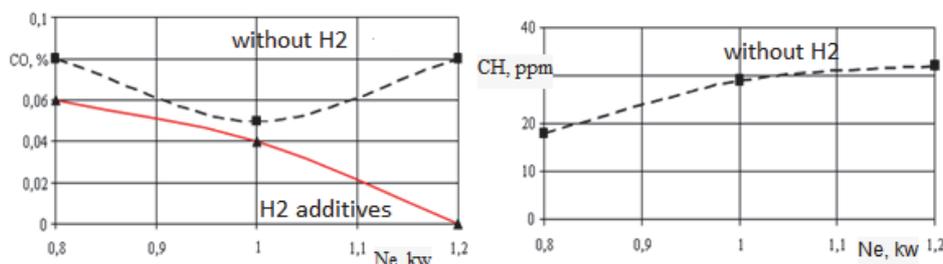


Figure 1. Diesel exhaust toxicity characteristics [1]:

---■--- work on piece fuel; —▲— work on fuel with microadditive H₂

Высокая скорость сгорания водородовоздушной смеси и высокая скорость нарастания давления в цилиндрах двигателя способствуют повышению индикаторного КПД двигателя.

1. Влияние водорода на процесс сгорания основного топлива

Особенности рабочего процесса ДВС, использующих водород, определяются свойствами водородовоздушной смеси – пределами воспламенения и распространения фронта пламени, температурой и энергией воспламенения – все эти свойства у водорода лучше, чем у углеводородных топлив (см. таблицу) [2–4].

Имея скорость пламени, которая практически на порядок выше, чем у углеводородов, водород, действуя как своего рода катализатор «предварительного зажигания», воспламеняет рабочую смесь, обеспечивая полноту сгорания за короткое время,

большее давление и тепловую энергию, что способствует увеличению крутящего момента [5–7]. При более полном сгорании топлива уменьшаются выбросы вредных веществ в отработавших газах.

Нижний предел воспламенения водорода в несколько раз выше, чем у нефтяных топлив, что позволяет получить высокую экономичность по сравнению с ДВС, работающими на топливе нефтяного происхождения.

Удельный расход топлива определяем следующим образом:

$$gt = \frac{G_6 + G_{H_2} \cdot Q_{нH_2} / Q_{н6}}{N_e}$$

где G₆, G_{H₂} – расход бензина и водорода соответственно, г/ч; Q_{нH₂}, Q_{н6} – низшие теплоты сгорания водорода и бензина соответственно; N_e – эффективная мощность двигателя [8].

Таблица

Основные свойства бензина и водорода

Характеристики	Бензин	Водород
Плотность топлива, кг/м ³	750	0,0899
Минимальная энергия воспламенения, МДж	0,24	0,02
Низшая теплотворная способность, МДж/кг	44	120
Стехиометрическое количество воздуха на 1 кг топлива, кг/кг	14,9	34,3
Максимальная ламинарная скорость сгорания, м/с	0,30	2,75
Коэффициент диффузии, см ² /с	0,06	0,63
Концентрационный предел распространения пламени, α	$\alpha_{\max} - 0,40; \alpha_{\min} - 1,3$	$\alpha_{\max} - 0,22; \alpha_{\min} - 4,0$

Table

The main properties of gasoline and hydrogen

Characteristics	Gasoline	Hydrogen
Density of fuel, kg/m ³	750	0,0899
Minimum ignition energy, MJ	0,24	0,02
Lower calorific value, MJ/kg	44	120
Stoichiometric amount of air per 1 kg of fuel, kg/kg	14,9	34,3
Maximum laminar combustion rate, m/s	0,30	2,75
Diffusion coefficient, cm ² /s	0,06	0,63
Concentration limit of flame propagation, α	$\alpha_{\max} - 0,40; \alpha_{\min} - 1,3$	$\alpha_{\max} - 0,22; \alpha_{\min} - 4,0$

Работы по использованию водорода в ДВС ведутся давно [1; 2; 9–13], первый патент на использование водорода в качестве топлива для двигателя внутреннего сгорания получил Франсуа Исаак де Риваз в 1807 году, тем не менее водород как топливо для ДВС не нашел широкого применения. Основными факторами, сдерживающими его использование, являются вопросы, связанные с взрывобезопасностью, хранением водорода на борту автомобиля, инфраструктурой – производством, перевозкой, хранением, заправочными станциями и т. д.

В связи с этим разработка компактного и безопасного оборудования по производству водорода на борту автомобиля – без его аккумулялирования и хранения – является актуальной задачей и одним из приоритетных направлений исследования [14; 15].

2. Техническое решение

Предлагаемое устройство состоит из оборудования для получения водорода (электролизера, установленного в подкапотном пространстве, источников альтернативной энергии, аккумулятора электрической энергии) и трубопроводов подачи водорода в систему питания двигателя внутреннего сгорания [16].

От сгенерированной и саккумулялированной энергии обеспечивается работа электролизера, а получаемый газ (газ Брауна) без аккумулялирования и хранения направляется во впускной коллектор двигателя.

С целью обеспечения генерации необходимого объема водорода в соответствии с режимом работы двигателя внутреннего сгорания в конструкции предусмотрен электронный блок управления, позволяющий путем считывания импульсов с топливной форсунки изменять объем генерируемого газа в зависимости от частоты вращения коленчатого вала [16].

Путем математического преобразования определяется частота коленчатого вала, исходя из значений которой на выходе контроллера формируется ШИМ-сигнал (широкоимпульсная модуляция) (рис. 2), управляющий силовым ключом, обеспечивающим силу тока в цепи генератора водорода в заранее заданном диапазоне, например: 10 % мощности генератора задается при условии достижения частоты вращения коленчатого вала 800 об. мин., 100 % мощности задается при частоте коленчатого вала 3500 об. мин [16].

Применение широкоимпульсной модуляции позволяет управлять мощностью генератора водорода посредством изменения скважности импульсов при постоянной частоте. Задаваемые предельные значения частоты вращения коленчатого вала двигателя для достижения максимальной и минимальной мощности могут быть оперативно изменены установкой соответствующих значений в памяти электронного контроллера, что обеспечивает применение контроллера для различных двигателей.

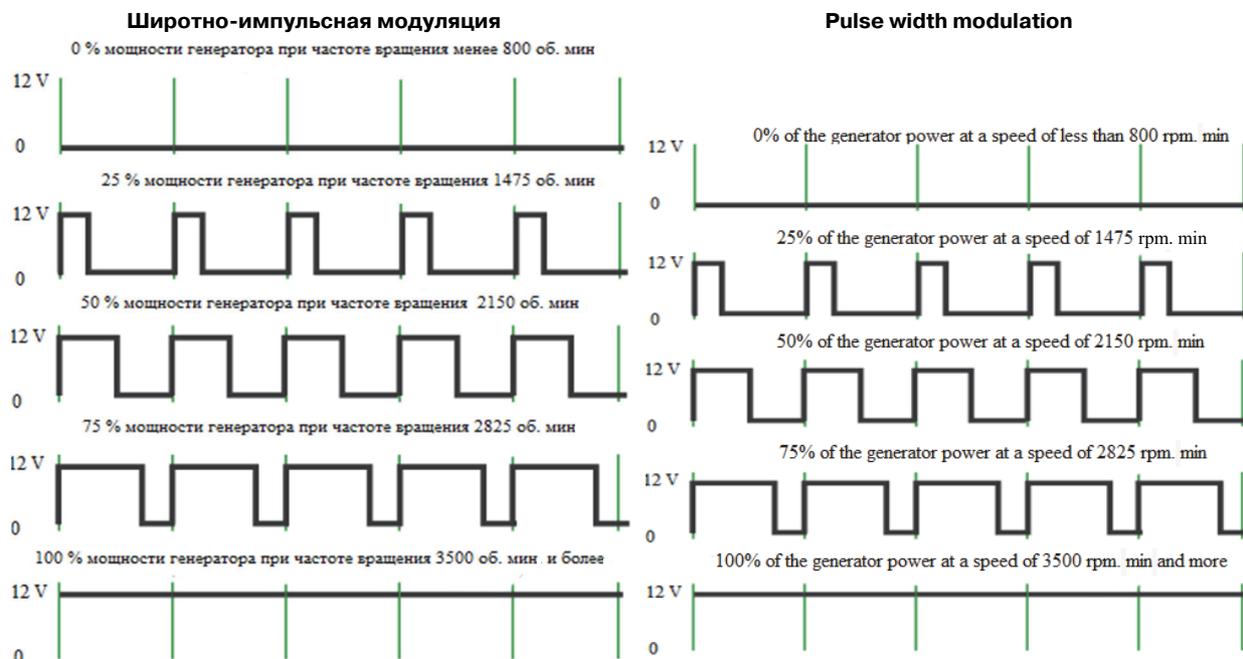


Рис. 2. Зависимость мощности генератора водорода от частоты вращения коленчатого вала

Figure 2. The dependence of the power of the hydrogen generator on the rotational speed of the crankshaft

Заключение

Перспективность применения водорода в качестве добавки к основному топливу ДВС с целью совершенствования показателей рабочего цикла двигателя обусловлена:

- возможностью снижения токсичности отработавших газов по основным компонентам CO, CH, NO_x;
- снижением вредных выбросов в отработавших газах ДВС, достигаемым при повышении его топливной экономичности;
- практической реализацией предлагаемого способа без значительных конструктивных изменений ДВС.

Список литературы

1. Авраменко А.Н., Левтеров А.М., Бганцев В.Н., Гладкова Н.Ю., Киреева В.Н. Перспективы применения микродобавок водорода для улучшения экологических показателей дизельного двигателя // Journal of Mechanical Engineering. 2019. Vol. 22. No. 2.
2. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев: Наукова думка, 1984. 143 с.
3. Бортников Л.Н., Русаков М.М. Оценка экономических и экологических показателей поршневых ДВС с искровым зажиганием при их работе на смеси «бензин – водород» // Автомобильная промышленность. 2008. № 2. С. 12–15.

4. Певнев Н.Г., Понамарчук В.В. Анализ свойств водорода с целью возможности его применения в качестве добавки к основному топливу // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. тр. конф. Оренбург, 2015. С. 304–309.

5. Gilchrist S., Rand T. Hydrogen fuel injection to improve engine efficiency the practical beginning of the hydrogen economy. Canada: Canadian Hydrogen Energy Company. 15 p. URL: <http://nha.confex.com/nha/2007/recordingredirect.cgi/id/196> (дата обращения: 20.04.2020 г.).

6. Кудряш А.П., Мараховский В.П., Кайдалов А.А. Теоретические и экспериментальные исследования сгорания водорода в дизеле // Вопросы атомной техники и технологии. Серия: Ядерная техника и технологии. 1989. Вып. 2. С. 48–50.

7. Мараховский В.П., Кайдалов А.А. Водородный дизель // Автомоб. пром-сть. 1992. № 2. С. 17–19.

8. Левин Ю.В. Улучшение топливной экономичности и экологичности роторно-поршневого двигателя за счет добавок свободного водорода к основному топливу: дис. ... к. т. н. Волгоград, 2016.

9. Крутенев В.Ф., Каменев В.Ф. Перспективы применения водородного топлива для автомобильных двигателей // Конверсия в машиностроении. 1997. № 6. С. 73–79.

10. Смоленский В.В., Смоленская Н.М., Шайкин А.П. Влияние добавки водорода на процесс горения в бензиновых двигателях с искровым зажиганием // Прогресс транспортных средств и систем – 2009: материалы Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Ч. 1. Волгоград, 2009. С. 247–248.

11. Шатров Е.В., Раменский А.Ю., Кузнецов В.М. Исследование мощностных, экономических и токсических характеристик двигателя, работающего на бензино-водородных смесях // *Автомобильная промышленность*. 1979. № 11. С. 3–5.

12. Раменский А.Ю., Шелищ П.Б., Нефедкин С.И. Применение водорода в качестве моторного топлива для автомобильных двигателей внутреннего сгорания. История, настоящее и перспективы // *Альтернативная энергетика и экология*. 2006. № 11. С. 63–70.

13. A History of the Automobile. URL: <https://www.thoughtco.com/who-invented-the-car-4059932> (дата обращения: 19.04.2020 г.).

14. RONN Motor Group, Inc. (RMG/RONN). URL: <https://www.ronnmotorgroup.com/> (дата обращения: 20.04.2020 г.).

15. Roberts D. This company may have solved one of the hardest problems in clean energy // *Vox*. 2018, February 16. URL: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2018/2/16/16926950/hydrogen-fuel-technology-economyhytech-storage> (accessed: 20.04.2020).

16. Асоян А.Р., Битюков С.И., Лебедев И.А., Асоян И.А. Использование водорода в качестве добавки к основному топливу в двигателях внутреннего сгорания // *Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: сб. научн. трудов по материалам 77-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ*. М., 2019. С. 103–108.

Для цитирования

Асоян А.Р., Данилов И.К., Асоян И.А., Полищук Г.М. Применение водорода в двигателях внутреннего сгорания // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 14–19. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-14-19>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-14-19

Research paper

Hydrogen application in internal combustion engines

Arthur R. Asoyan

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, 64 Leningradsky Ave, Moscow, 125319, Russian Federation; Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Igor K. Danilov, Igor A. Asoyan, Georgy M. Polishchuk

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

Article history:

Received: April 15, 2020

Revised: April 22, 2020

Accepted: April 30, 2020

Keywords:

internal combustion engines, hydrogen, resource saving of petroleum fuels, environmental indicators

A technical solution has been proposed to reduce the consumption of basic hydrocarbon fuel, to improve the technical, economic and environmental performance of internal combustion engines by affecting the combustion process of the fuel-air mixture with a minimum effective mass fraction of hydrogen additive in the fuel-air mixture. The burning rate of hydrogen-air mixtures is an order of magnitude greater than the burning rate of similar mixtures based on gasoline or diesel fuel, compared with the former, they are favorably distinguished by their greater detonation stability. With minimal additions of hydrogen to the fuel-air charge, its combustion time is significantly reduced, since hydrogen, having previously mixed with a portion of the air entering the cylinder and burning itself, effectively ignites the mixture in its entirety. Issues related to the accumulation of hydrogen on board the car, its storage, explosion safety, etc., significantly inhibit the development of mass production of cars using hydrogen fuel. The described technical solution allows the generation of hydrogen on board the car and without accumulation to use it as an additive to the main fuel in internal combustion engines. The technical result is to reduce the consumption of hydrocarbon fuels (of petroleum origin) and increase the environmental friendliness of the car due to the reduction of the emission of harmful substances in exhaust gases.

Arthur R. Asoyan, Professor of the Department of Automotive Transport and Car Service of (MADI), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1976-9376>, asoyan.ar@mail.ru

Igor K. Danilov, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7142-7461>.

Igor A. Asoyan, graduate student of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

Georgy M. Polishchuk, Professor of the Department of Mechanics and Mechatronics of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor.

References

1. Avramenko AN, Levterov AM, Bgantsev VN, Gladkova NYu, Kireeva VN. Perspektivy primeneniya mikro-dobavok vodoroda dlya uluchsheniya ekologicheskikh pokazatelei dizel'nogo dvigatelya [Prospects for the use of hydrogen microadditives to improve the environmental performance of a diesel engine]. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019;22(2). (In Russ.)
2. Mishchenko AI. *Primenenie vodoroda dlya avtomobil'nykh dvigatelei* [The use of hydrogen for automotive engines]. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1984. (In Russ.)
3. Bortnikov LN, Rusakov MM. Otsenka ekonomicheskikh i ekologicheskikh pokazatelei porshnevnykh DVS s iskrovym zazhiganiem pri ikh rabote na smesi "benzin – vodorod" [Evaluation of the economic and environmental indicators of piston ICEs with spark ignition during their operation on a gas-hydrogen mixture]. *Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry]*. 2008;(2):12–15. (In Russ.)
4. Pevnev NG, Ponamarchuk VV. Analiz svoystv vodoroda s tselyu vozmozhnosti ego primeneniya v kachestve dobavki k osnovnomu toplivu [Analysis of the properties of hydrogen with a view to the possibility of its use as an additive to the main fuel]. *Progressivnye tehnologii v transportnykh sistemakh [Advanced technologies in transport systems]*: proceedings of conference. Orenburg; 2015. p. 304–309. (In Russ.)
5. Gilchrist S, Rand T. *Hydrogen fuel injection to improve engine efficiency the practical beginning of the hydrogen economy*. Canada: Canadian Hydrogen Energy Company. Available from: <http://nha.confex.com/nha/2007/recordingredirect.cgi/id/196> (accessed: April 20, 2020).
6. Kudryash AP, Marakhovsky VP, Kaydalov AA. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya sgoraniya vodoroda v dizele [Theoretical and experimental studies of hydrogen combustion in a diesel engine]. *Voprosy atomnoi tekhniki i tekhnologii. Seriya: Yadernaya tekhnika i tekhnologii [Questions of atomic engineering and technology. Series: Nuclear technics and technology]*. 1989;(2): 48–50. (In Russ.)
7. Marakhovsky VP, Kaydalov AA. Vodorodnyi dizel [Hydrogen diesel]. *Avtomobil'naya promyshlennost' [Auto industry]*. 1992;(2):17–19. (In Russ.)
8. Levin YuV. *Uluchshenie toplivnoi ekonomichnosti i ekologichnosti rotorno-porshnevoogo dvigatelya za schet dobavok svobodnogo vodoroda k osnovnomu toplivu [Improving fuel economy and environmental friendliness of a rotary piston engine due to the addition of free hydrogen to the main fuel]*: dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Volgograd; 2016. (In Russ.)
9. Krutenev VF, Kamenev VF. Perspektivy primeneniya vodorodnogo topliva dlya avtomobil'nykh dvigatelei [Prospects for the use of hydrogen fuel for automotive engines]. *Konversiya v mashinostroenii [Conversion in mechanical engineering]*. 1997;(6):73–79. (In Russ.)
10. Smolensky VV., Smolenskaya NM, Shaikin AP. Vliyanie dobavki vodoroda na protsess goreniiya v benzinovykh dvigatelyakh s iskrovym zazhiganiem [Influence of hydrogen additives on the combustion process in gas engines with spark ignition]. *Progress transportnykh sredstv i sistem – 2009 [Progress of Vehicles and Systems – 2009]*: materials of the International Scientific and Practical Conference (part 1). Volgograd; 2009. p. 247–248. (In Russ.)
11. Shatrov EV., Ramensky AYu, Kuznetsov VM. Issledovanie moshchnostnykh, ekonomicheskikh i toksicheskikh kharakteristik dvigatelya, rabotayushchego na benzino-vodorodnykh smesyakh [Study of power, economic and toxic characteristics of an engine running on gasoline-hydrogen mixtures]. *Avtomobil'naya promyshlennost' [Automotive industry]*. 1979;(11):3–5. (In Russ.)
12. Ramensky AYu, Shelisch PB, Nefedkin SI. Primenenie vodoroda v kachestve motornogo topliva dlya avtomobil'nykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya. Istoriya, nastoyashchee i perspektivy [The use of hydrogen as a motor fuel for automotive internal combustion engines. History, present and prospects]. *Alternativnaya energetika i ekologiya [Alternative energy and ecology]*. 2006;(11):63–70. (In Russ.)
13. A History of the Automobile. Available from: <https://www.thoughtco.com/who-invented-the-car-4059932> (accessed: April 19, 2020).
14. RONN Motor Group, Inc. (RMG/RONN). Available from: <https://www.ronnmotorgroup.com/> (accessed: April 20, 2020).
15. Roberts D. This company may have solved one of the hardest problems in clean energy. *Vox*. 2018, February 16. Available from: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2018/2/16/16926950/hydrogen-fuel-technology-economyhytech-storage> (accessed: April 20, 2020).
16. Asoyan AR, Bitukov SI, Lebedev IA, Asoyan IA. Ispol'zovanie vodoroda v kachestve dobavki k osnovnomu toplivu v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya [The use of hydrogen as an additive to the main fuel in internal combustion engines]. *Problemy tekhnicheskoi ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobilnogo transporta [Problems of technical operation and car service of rolling stock of motor vehicles]*: collection of proceedings on the materials of the 77th Scientific-Methodological and Scientific-Research Conference of MADI. Moscow; 2019. p. 103–108. (In Russ.)

For citation

Asoyan AR, Danilov IK, Asoyan IA, Polishchuk GM. Hydrogen application in internal combustion engines. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):14–19. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-14-19> (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-20-26

УДК 629.1

Научная статья

Топологическая оптимизация детали «Серьга»

Н.В. Камардина, Р.М. Гусейнов, И.К. Данилов, В.Н. Коноплёв, К.А. Иванов, А.С. Жарко, Г.М. Полищук

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 22 апреля 2020 г.

Доработана: 14 мая 2020 г.

Принята к публикации: 15 мая 2020 г.

Ключевые слова:

аддитивные технологии, топологическая оптимизация, деталь «Серьга», САПР

Последние десятилетия активного развития компьютерных технологий и программного обеспечения, к примеру системы автоматизированного проектирования (САПР), инновационные машиностроительные предприятия уменьшают вес и трудоемкость изготовления деталей, а также поднимают надежность и качество своих изделий. Учитывая различные требования спроса потребителей, передовые компании при проектировании используют технологию топологической оптимизации. Популярность данного метода для эффективного проектирования изделий быстро растет благодаря непрерывно увеличивающимся вычислительной мощности компьютеров и возможностям программ. В настоящее время некоторые программы имеют модуль топологической оптимизации, который позволяет проектировать модель изделия с нуля, указав лишь параметры рабочих поверхностей детали. С помощью этого модуля также можно оптимизировать конструкцию, снизив вес исходного тела в рамках граничных условий (при этом сохранить деформацию, прочность исходной детали и т. д.). На выходе чаще всего образуется сложная объемная конструкция. В настоящем исследовании на примере детали «Серьга» топологическая оптимизация применялась для решения следующей задачи: при сохранении прочностных характеристик уменьшить массу изделия относительно прототипа и после проведения проверочного расчета выполнить анализ проделанной работы, дав оценку данной методике.

Введение

Использование метода топологической оптимизации для эффективного проектирования изде-

лий быстро растет, благодаря непрерывно возрастающим вычислительной мощности компьютеров и возможностям программ. Одна из первых отраслей, которая начала применять данную технологию в разработках, – аэрокосмическая промышленность. Но со временем и другие области, такие как автомобильная, нефтегазовая, военная промышленность, которым требуются легкие и надежные детали, начали использовать имеющиеся технологии и возможности. В статье Д.Д. Попова, Н.А. Самойленко, С.В. Семенов, А.А. Балакирев, А.Ю. Головкин «Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД» авторы пишут: «Топологическая оптимизация – это численный метод, который позволяет изменить форму рассматриваемого элемента или объекта путем изменения его геометрии. Данный метод является математической задачей,

Камардина Наталья Валерьевна, студентка департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, 1032142655@rudn.ru

Гусейнов Руслан Мукайлович, аспирант департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Данилов Игорь Кеворкович, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7142-7461>, Scopus Author ID: 57210770802, eLIBRARY SPIN-код: 1633-2700, AuthorID: 659686.

Коноплёв Владимир Николаевич, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1662-6254>, Scopus Author ID: 57206670076, eLIBRARY SPIN-код: 3876-1534, AuthorID: 491560.

Иванов Кирилл Аркадьевич, студент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Жарко Андрей Сергеевич, студент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Полищук Георгий Максимович, профессор департамента механики и механики Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор.

© Камардина Н.В., Гусейнов Р.М., Коноплёв В.Н., Данилов И.К., Иванов К.А., Жарко А.С., Полищук Г.М., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

основная цель которой состоит в поиске распределения материала по площади или объему» [1]. Этот способ позволяет оригинально подойти к проектированию и предложить решения, выходящие за имеющиеся рамки опыта и подхода к проектированию конструктора. Однако главным недостатком данного приема является возможность появления несвязанных между собой объемов исходного тела [1], поэтому инженерный опыт будет всегда востребован для оценки результатов, определения ограничений и выбора оптимальных решений. Одним из благоприятных факторов использования деталей, спроектированных топологической оптимизацией, является эффективное использование вторичного сырья различных металлов. Уменьшение веса компонентов помогает значительно снизить общую массу изделия, к чему стремится современное машиностроение для того, чтобы поднимать экономические характеристики своего товара.

Многие компании боятся использовать такую методику, потому что им не хватает опыта работы с данной технологией и они сомневаются в правильности результатов. Поэтому основной целью является предоставление знаний о теоретических основах использования топологической оптимизации и информации о том, как выполнить оптимизацию с помощью коммерческого программного обеспечения моделирования ANSYS. Цель также состоит в том, чтобы выполнить расчетное исследование изменения жесткости конструктивно подобно маятника «Серьга» подвески мотоцикла путем уменьшения массы детали с помощью SIMP-метода (Solid Isotropic Material with Penalization) топологической оптимизации [1], а также в оценке простоты использования.

1. Теория топологической оптимизации

Топологическая оптимизация – это мощный метод оптимизации для оценки и расширения пространственных решений и повышения креативности при проектировании и определении размеров несущих конструкций, направленный на поиск оптимально использованного материала в заданном расчетном пространстве, которое отвечает указанным требованиям по жесткости, перемещению и граничным условиям. Иными словами, топологическая оптимизация направлена на поиск оптимально нагруженного материала для назначенной нагрузки и граничных условий. Для расчета используют метод конечных элементов. Суть данного подхода заключается в том, что каждому ко-

нечному элементу присваивается относительная плотность, несущая вклад в общую матрицу жесткости. Решением задачи топологической оптимизации в данных условиях является распределение условной плотности в области проектирования [2].

Существует несколько видов ограничений при топологической оптимизации: по прочностным характеристикам, по объему, по податливости, по перемещению, а также по их сочетаниям.

Задачи процесса топологической оптимизации можно разделить на несколько условных этапов:

- составление технических требования к изделию;
- формулирование концепции конструкции детали;
- топологическая оптимизация детали по поставленному техническому требованию;
- прочностной расчет полученной конструкции, учитывая нагрузки и технические требования, включая анализ технологичности изготовления детали (нередко оптимизированные детали невозможно или дорого изготовить, в этом случае может помочь ввод дополнительных ограничений на оптимизацию детали);
- анализ окончательной оптимальной конструкции.

Существует проблема решений оптимизации. Если рассматривать любую точку в заданном пространстве с учетом дискретности используемых математических моделей, то в ней либо есть материал, либо он отсутствует. В результате чего страдает процесс оптимизации. Для решения этой проблемы современные программы используют алгоритм промежуточной плотности. Часто применяется готовое решение педализации для твердого изотропного тела – SIMP [2]. Этот метод связывает плотность тела с модулем упругости тела, благодаря чему помогает решить вышеупомянутую проблему [3–6].

При топологической оптимизации «Серьги» в граничных условиях будут изменены не только масса и объем тела, но и форма. В качестве образца применения принципа топологической оптимизации на рис. 1 изображен пример определения оптимальной конструкции опоры, нагруженной распределенной нагрузкой с минимальной массой. На рис. 1, а показаны граничные условия, нагрузки, а также области проектирования и неизменяемых частей модели. На рис. 1, б приведено распределение условной плотности, соот-

ветствующей минимальной потенциальной энергии деформирования, где темным цветом выделены зоны, условная плотность которых соответствует 1, светлым – со значениями условной плотности близкими к 0 (эта величина всегда положительна). На рис. 1, в продемонстрирована полученная итоговая модель [2].

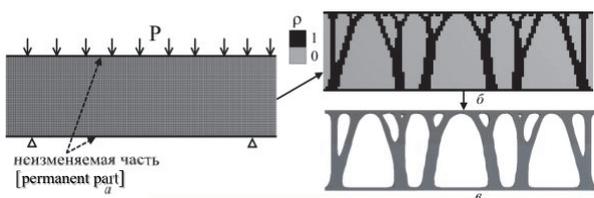


Рис. 1. Постановка задачи топологической оптимизации (а), распределение условной плотности (б) и полученная твердотельная модель (в) [2]
[Figure 1. Statement of the topological optimization problem (a), conditional density distribution (б), and the resulting solid-state model (в) [2]]

Подробное описание методов топологической оптимизации можно найти в статьях [2; 6–12].

2. Топологическая оптимизация конструкции детали «Серьга»

Задача исследования – разработать модель детали «Серьга» облегченной оптимизированной формы для тестового испытания с минимальной массой и сохранением прочностных характеристик.

К центральному отверстию детали прикладывалась нагрузка (F) размером 750 Н, при этом два крайних отверстия (1, 3) жестко закреплены (рис. 2.)

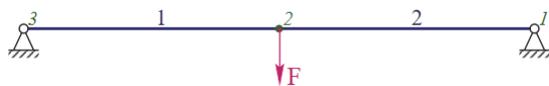


Рис. 2. Распределение нагрузки
[Figure 2. The load distribution]

Работы по оптимизации выполняются в три этапа:

1) прочностной расчет «Серьги» под заданную нагрузку и заключение о возможности ее оптимизации по массе (в случае положительного заключения осуществляются топологическая оптимизация компоновочного объема и разработка САД-модели);

2) прочностной расчет разработанной детали и доработка (если это необходимо);

3) проверочный прочностной расчет доработанного рычага.

В ходе исследования была разработана модель «Серьги» в САД-системе с применением технологии топологической оптимизации (образец 2) и облегчением путем удаления материала (образец 1) (рис. 3).

В качестве материала для изготовления компонента рассматривался пластик полиамид PA12-L 1600, механические свойства которого приведены в таблице.

Таблица

Механические свойства пластика полиамида PA12-L 1600 [13]
[Table. Mechanical properties of plastic polyamide PA12-L 1600 [13]]

Свойства [Properties]	Значения [Values]
Плотность, кг/м ³ [Density of parts, kg/m ³]	950
Предельная плотность, МПа [Tensile strength, MPa]	46
Модуль упругости при изгибе, МПа [Flexural modulus, MPa]	1300
Модуль упругости при растяжении, МПа [Tensile modulus, MPa]	1602
Прочность на изгиб, МПа [Flexural strength, MPa]	46,3
Предел прочности, МПа [Tensile strength, MPa]	46
Удлинение при разрыве [Elongation break]	не менее 36 %



Рис. 3. Исходная модель исследуемой «Серьги»
[Figure 3. Initial model of the investigated “Earring”]

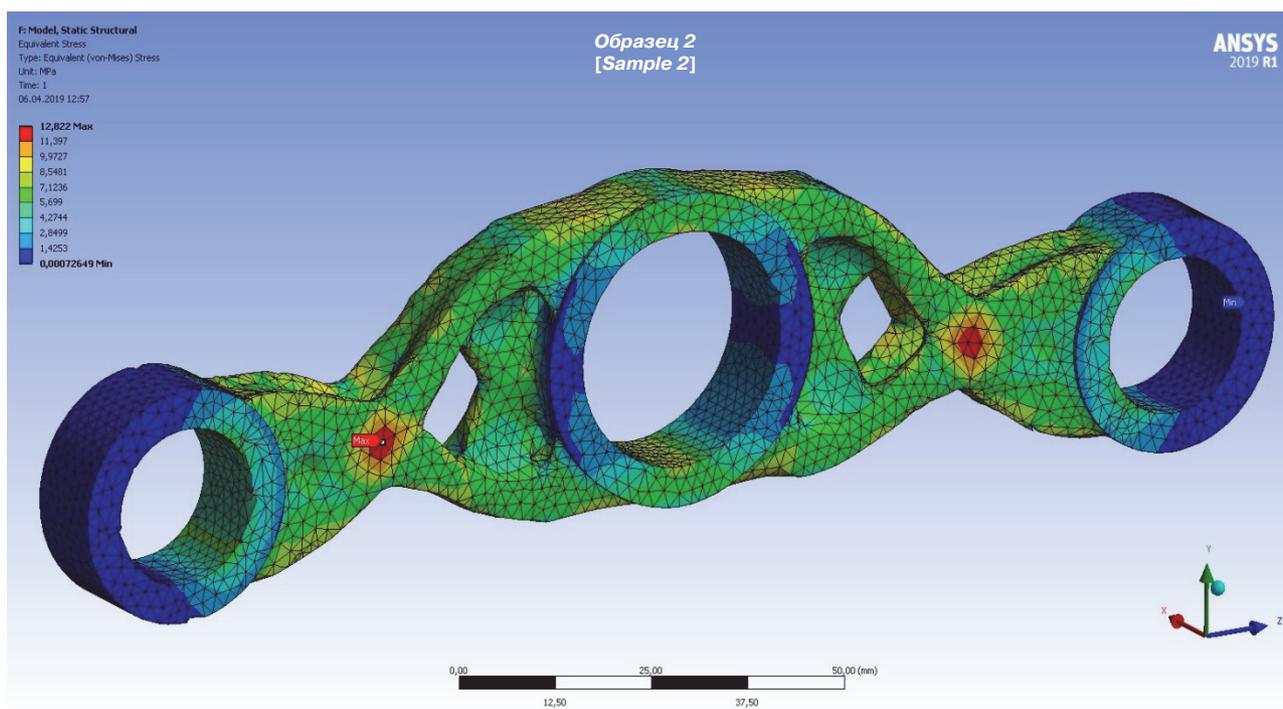
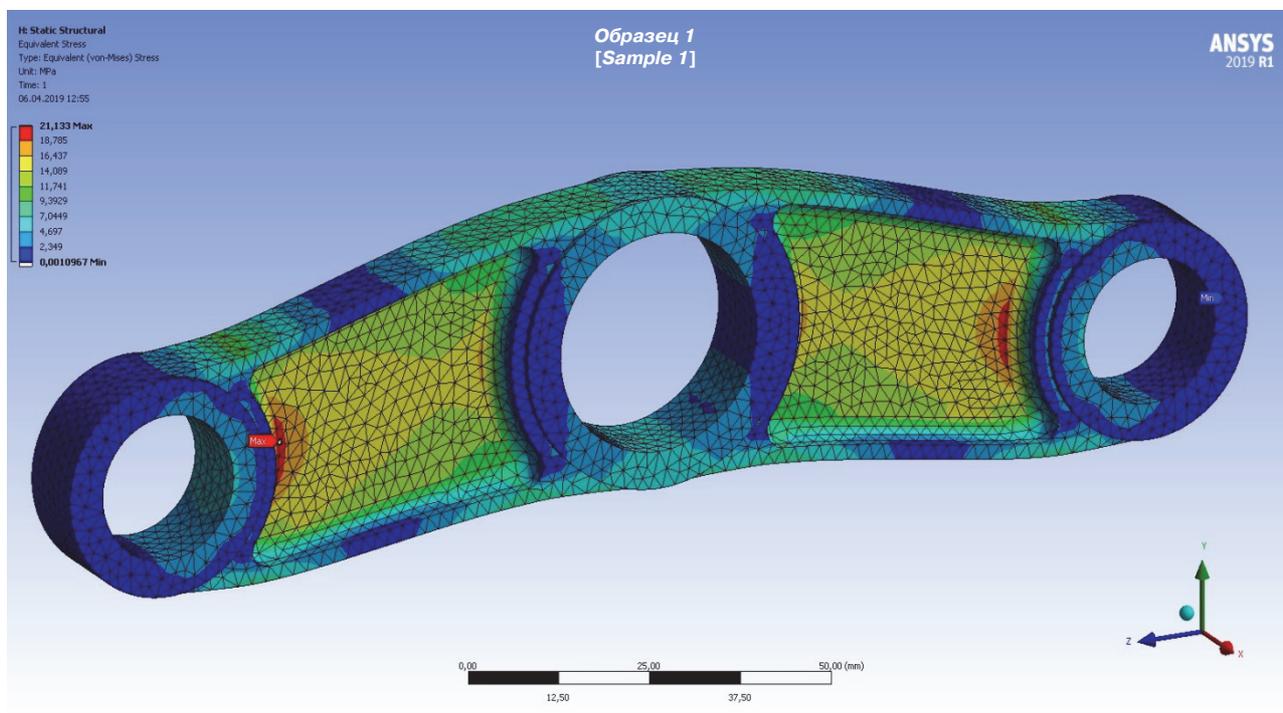


Рис. 4. Результаты топологической оптимизации исследуемой «Серьги» [14]
[Figure 4. Results of topological optimization of the investigated “Earring” [14]]

По результатам топологической оптимизации, представленным на рис. 4, смещения при нагрузке 750 Н удовлетворяют требованиям. Жесткость в оптимизированной детали сохранилась,

а напряжение уменьшилось. Выигрыш в массе составляет 24 %, при этом прочность возросла в 25 %. Таким образом, оптимизация считается успешной.

Заключение

В статье была отражена тема топологической оптимизации с базовой теорией и практическим применением в программной среде ANSYS. Использование данной методики для разработки детали может показаться, на первый взгляд, не вполне понятным из-за трудных математических алгоритмов, предназначенных для сложных деталей и узлов. Однако приведенный в статье наглядный пример приложения этой технологии в будущем поможет другим специалистам использовать данные навыки в своей работе. Применение методики топологической оптимизации позволяет уменьшить массу детали при сохранении ее жесткостных и прочностных характеристик [1]. Анализ полученных результатов показал пригодность применения топологической оптимизации при проектировании детали «Серьга»; более того, методика помогла существенно повысить характеристики детали.

Объединение новых подходов к проектированию и технологий производства, наряду с использованием новых материалов, может способствовать существенному повышению характеристики деталей, узлов и изделий в целом [2; 15].

Список литературы

1. Попова Д.Д., Самойленко Н.А., Семенов С.В., Балакирев А.А., Головкин А.Ю. Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2018. № 55. Ч. 1. С. 42–51.

2. Васильев Б.Е., Маггеррамов Л.А. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14. № 3. Ч. 1. С. 139–147.

3. Bendsoe M.P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods and applications. Springer-Verlag, 2003. Pp. 370–375.

4. Боровиков А.А., Тененбаум С.М. Топологическая оптимизация переходного отсека КА // Аэрокосм. науч. журн. 2016. № 5. С. 16–30.

5. Французов А.В., Шаповалов Я.И., Вдовин Д.С. Применение метода топологической оптимизации в задачах проектирования грузоподъемной техники // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2 (42). С. 99–108.

6. Шестаков Д. Применение Generative Design для оптимизации конструкции кронштейна авиадвигателя // Аддитивные технологии. URL: <https://additiv-tech.ru/publications/primenenie-generative-design-dlya-optimizacii-konstrukcii-kronshteyna-aviadvigatelya> (дата обращения: 12.06.2019 г.).

7. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 51–61.

8. Кротких А.А., Максимов П.В. Исследование и модификация метода топологической оптимизации SIMP // Междунар. науч.-исслед. журн. 2016. № 1 (55). С. 91–94.

9. Bruns T. A reevaluation of the SIMP method with filtering and an alternative formulation for solid – void topology optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2005, December. Vol. 30. Pp. 428–436.

10. Jiao H., Zhou Q., Fan S., Li Yu. A new hybrid topology optimization method coupling ESO and SIMP method // Lecture Notes in Electrical Engineering Proceedings of China. Modern Logistics Engineering, 2014. Pp. 373–384.

11. Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches – a comparative review// Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013, December. Vol. 48. Pp. 1031–1055.

12. Koga J., Koga J., Homma S. Checkerboard problem to topology optimization of continuum structures. Saitama: Saitama University, 2013. Pp. 10–15.

13. Prodways Group. URL: <https://www.prodways.com> (дата обращения: 21.03.2020 г.).

14. Ansys. URL: <https://www.ansys.com> (дата обращения: 28.03.2020 г.).

15. Максимов П.В., Фетисов К.В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации // Междунар. науч.-исслед. журн. 2016. № 9 (51). Ч. 2. С. 58–60.

Для цитирования

Камардина Н.В., Гусейнов Р.М., Данилов И.К., Коноплев В.Н., Иванов К.А., Жарко А.С., Полищук Г.М. Топологическая оптимизация детали «Серьга» // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 20–26. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-20-26>

Topological optimization of the “Earring” element

Natalia V. Kamardina, Ruslan M. Guseynov, Igor K. Danilov,
Vladimir N. Konoplev, Kirill A. Ivanov, Andrey S. Zharko, Georgy M. Polishchuk

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

Article history:

Received: April 22, 2020

Revised: May 14, 2020

Accepted: May 15, 2020

Keywords:

additive technologies, topological optimization, “Earring” element, CAD

In recent decades, computer technologies and software such as computer-aided design (CAD) have been actively developing. Thanks to this, modern machine-building enterprises increase the reliability and quality of their products while reducing their weight and complexity of manufacturing. In order to meet numerous requirements, leading companies are increasingly using topological optimization tools at various design stages. The use of this method for effective product design is growing rapidly, due to the continuously increasing computing power of computers and software capabilities. Modern software for topological optimization allows to design the shape of the part from scratch, setting only the conditions for fixing and touching surfaces, and also allows to improve existing structures by reducing their weight based on the set restrictions (equal strength with the original part, equal deformation, preservation of natural frequency, etc.). However, the result of topological optimization is often a complex spatial structure. Using the example of the “Earring” element, a topological optimization of the structure was performed to ensure that the strength requirements were met and that the minimum mass was obtained. As a result of optimization, the design of a reduced weight compared to the prototype is obtained. The results of the verification calculation showed the sufficiency of the values of the strength reserves of the final design of the “Earring”.

References

1. Popova DD, Samoilenko NA, Semenov SV, Bakirev AA, Golovkin AYu. Primenenie metoda topologicheskoi optimizatsii dlya umen'sheniya massy konstruktivno podobnogo kronshteina truboprovoda aviatsionnogo GTD [Pipeline aviation gas turbine engine]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of PNIPU. Aerospace Engineering]*. 2018;(55–1):42–51. (In Russ.)

2. Vasiliev BE, Maharramov LA. Analiz vozmozhnosti primeneniya topologicheskoi optimizatsii pri proektirovani neokhlazhdaemykh rabochikh lopatok turbin [Analysis

of the possibilities of applying topological optimization in the design of uncooled turbine blades]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University]*. 2015;14(3–1): 139–147. (In Russ.)

3. Bendsoy MP, Sigmund O. *Optimization of topology: theory, methods and applications*. Springer Verlag; 2003. p. 370–375.

4. Borovikov AA, Tenenbaum SM. Topologicheskaya optimizatsiya perekhodnogo otseka KA [Topological optimization of the spacecraft transition compartment]. *Aerokosmicheskii nauchnyi zhurnal [Aerospace Scientific Journal]*. 2016;(5):16–30. (In Russ.)

5. Frantsuzov AV, Shapovalov YI, Vdovin DS. Primenenie metoda topologicheskoi optimizatsii v zadachakh proektirovaniya gruzopod"emnoi tekhniki [Application of the method of topological optimization in the problems of designing lifting equipment]. *Izvestiya vuzov. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki [News of universities. Volga region. Technical science]*. 2017;2(42):99–108. (In Russ.)

6. Shestakov D. Primenenie Generative Design dlya optimizatsii konstruktivno kronshteina aviadvigatelya [Application of Generative Design to optimize the design of the aircraft engine bracket]. *Additivnye tekhnologii [Additive technologies]*. Available from: <https://additiv-tech.ru/publications/primeneniye-generative-design-dlya-optimizatsii->

Natalia V. Kamardina, student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University, 1032142655@rudn.ru

Ruslan M. Guseynov, postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University.

Igor K. Danilov, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7142-7461>, Scopus Author ID: 57210770802, eLIBRARY SPIN-code: 1633-2700, AuthorID: 659686.

Vladimir N. Konoplev, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1662-6254>, Scopus Author ID: 57206670076, eLIBRARY SPIN-code: 3876-1534, AuthorID: 491560.

Kirill A. Ivanov, student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University.

Andrey S. Zharko, student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation of Engineering Academy of RUDN University.

Georgy M. Polishchuk, Professor of the Department of Mechanics and Mechatronics of Engineering Academy of RUDN University, Doctor of Technical Sciences, Professor.

konstrukcii-kronshteyna-aviadvigatelya (accessed: June 12, 2019). (In Russ.)

7. Bashin KA, Torsunov RA, Semenov SV. Metody topologicheskoi optimizatsii konstruksii, primenyayushchiesya v aerokosmicheskoi otrasli [Methods of topological optimization of structures used in the aerospace industry]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering]*. 2017;(51):51–61. (In Russ.)

8. Krotkikh AA, Maksimov PV. Issledovanie i modifikatsiya metoda topologicheskoi optimizatsii SIMP [Research and modification of parameters of topological optimization SIMP]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Scientific Researcher Journal]*. 2016; 1(55):91–94. (In Russ.)

9. Bruns T. A reevaluation of the SIMP method with filtering and an alternative formulation for solid – void topology optimization. *Structural and interdisciplinary optimization*. 2005;30:428–436.

10. Jiao H, Zhou Q, Fan S, Li Yu. A new hybrid methodology for optimizing topology, combining the ESO and SIMP method. *Lecture Notes in Electrical Engineering Proceedings of China. Modern Logistics Engineering*; 2014. p. 373–384.

11. Sigmund O, Maut K. Optimization of the structure topology approaches: a comparative review. *Structural and interdisciplinary optimization*. 2013;48:1031–1055.

12. Koga J, Koga J, Homma S. *The task of a chessboard to optimize the topology of continuum structures*. Saitama, Japan: University of Saitama; 2013. p. 10–15.

13. Prodways Group. Available from: <https://www.prodways.com> (accessed: March 21, 2020).

14. Ansys. Available from: <https://www.ansys.com> (accessed: March 28, 2020).

15. Maksimov PV, Fetisov KV. Analiz metodov dorabotki konechno-elementnoi modeli posle topologicheskoi optimizatsii [Analysis of the methods of refinement of the finite element model after topological optimization]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal [International Scientific Researcher Journal]*. 2016;9(51–2): 58–60. (In Russ.)

For citation

Kamardina NV, Guseynov RM, Danilov IK, Konoplev VN, Ivanov KA, Zharko AS, Polishchuk GM. Topological optimization of the “Earring” element. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):20–26. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-20-26> (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-27-35

УДК 557.4.621.039.584

Научная статья

Моделирование эффективного решения утилизации вторичных энергоресурсов ПГУ на примере ПГУ-420Т

Ю.А. Антипов, И.К. Шаталов, К.В. Шкарин, А.С. Барыбина, Я.А. Огнева, П.Д. Морозов

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 13 апреля 2020 г.

Доработана: 24 мая 2020 г.

Принята к публикации: 3 июня 2020 г.

Ключевые слова:

теплонасосная установка, парогазотурбинная установка, утилизация, вторичные энергоресурсы, энергетическая эффективность, моделирование

В настоящее время большое внимание уделяется повышению эффективности работы энергетических установок путем использования вторичных энергоресурсов (ВЭР). В качестве базовой энергетической установки рассмотрен энергоблок ПГУ-420Т, где отвод тепла от основного и вспомогательного оборудования происходит в охладителях и направляется в систему циркуляционного водоснабжения через теплообменники замкнутого контура (ТЗК). В результате переданное тепло в количестве $Q_{\text{ТЗК}} \approx 6,4$ МВт утилизируется через градирню в окружающую среду. Предложено моделирование эффективного решения способа утилизации тепла замкнутого контура посредством применения многоступенчатой парокompрессионной теплонасосной установки (ТНУ). Кроме того, проведен расчет эффективности использования ВЭР в зависимости от количества ступеней ТНУ. Рассматривались несколько вариантов модели, например с двух-, трех- и четырехступенчатой ТНУ, были получены коэффициенты преобразования. Более того, установлены необходимые мощности для каждого варианта модели. Наконец, обсуждены экономические преимущества использования многоступенчатой ТНУ вместо традиционной одноступенчатой в течение годовой эксплуатации энергоблока ПГУ-420Т.

Введение

В последние годы в России появилась тенденция замены в теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) паро-

турбинных установок (ПГУ) с термическим КПД 45–48 % на современные энергоблоки, работающие по парогазовому циклу с термическим КПД 54–58 %. Только в Москве в период 2014–2015 гг. были введены в строй два энергоблока ПГУ-420Т и один – ПГУ-220Т [1; 2]. Несмотря на высокий КПД вновь установленных энергоблоков, имеют место потери тепловой энергии от работающих агрегатов, которые из-за низкого энергетического потенциала не используются в виде вторичного энергетического ресурса (ВЭР) [3], например дополнительного подогрева сетевой воды, а сбрасывается в окружающую среду.

Так, в работающей парогазотурбинной установке (ПГУ) ВЭР можно разделить следующим образом: 1) уходящие дымовые газы на выходе из котла-утилизатора (КУ); 2) тепло, отводимое от маслоохладителей турбин, трансформаторов и гидромурфт насосов; 3) тепло, отводимое от газо-

Антипов Юрий Александрович, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук, доцент, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5598-7522>, rudn-tit@yandex.ru

Шаталов Иван Касьянович, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук, профессор, доцент, eLIBRARY SPIN-код: 1624-5017, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3781-3788>

Шкарин Кирилл Владимирович, ассистент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, eLIBRARY SPIN-код: 4599-9150, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5680-517X>

Барыбина Анна Сергеевна, студентка 2-го курса по направлению «Энергетическое машиностроение» департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Огнева Яна Александровна, студентка 2-го курса по направлению «Энергетическое машиностроение» департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Морозов Павел Дмитриевич, студент 2-го курса по направлению «Энергетическое машиностроение» департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

© Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Шкарин К.В., Барыбина А.С., Огнева Я.А., Морозов П.Д., 2020

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

охлаждателей турбогенераторов; 4) тепло, отводимое от охлаждателей грязного конденсата, вакуумных установок и пробоотборных точек; 5) тепло, отводимое от конденсатора пара уплотнений (КПУ); 6) тепло, отводимое от конденсатора ПТУ. Каждый из видов ВЭР имеет различную долю тепловой энергии в тепловом балансе ПГУ и различные методы реализации их использования в повышении эффективности работы ПГУ [4; 5].

К примеру, был предложен проект утилизации сбросной теплоты паровой турбины Ленинградской АЭС-2 при помощи теплового насоса ТНСО2-2300 для подогрева сетевой воды с 28 до 80 °С, где коэффициент преобразования (COP) равен 5 [6; 7]. Уникальность проекта заключается в том, что для подпитки сетевой воды используют напрямую воду Ладожского озера, обладающую свойствами мягкой воды, пригодной для подогревателей сетевой воды. По проекту предполагалось прямую ветку сетевой воды с температурой 80 °С направить от Ленинградской АЭС-2 в Санкт-Петербург. Обратная ветка сетевой воды в этой схеме не предусмотрена, что и создает условия высокой рентабельности работы АЭС-2 в теплофикационном режиме. Однако опасения, что поступающая от АЭС-2 сетевая вода может содержать несколько повышенный фон излучения относительно фона окружающей среды, послужили одним из оснований не дать проекту воплотиться в жизнь.

Другим направлением поиска эффективного решения утилизации вторичных энергоресурсов стала разработка новой концепции использования теплораспределительных узлов [8]. Концепция основана на прокладке уличных магистралей, которые содержат две одиночные, одну двойную и одну тройную трубы. Такое разветвление создает подсеть с различными параметрами нагрева сетевой воды, где температура для сети специально оптимизирована по следующим параметрам: 1) потребление тепловой энергии; 2) коэффициент тепловых потерь; 3) начальные параметры в теплораспределительных узлах. Таким образом, была смоделирована сеть, основные узлы которой имели низкую рабочую температуру, что приведет к снижению потерь тепла.

Еще одно направление эффективного решения утилизации вторичных энергоресурсов предложено в работах [9–11], где рассматривается возможность повысить эффективность паротурбинной электростанции за счет использования солнечной

энергии. Благодаря размещению определенным образом зеркал, отраженные от них лучи фокусируются на поверхности дополнительного парогенератора, что позволяет существенно снизить удельный расход органического топлива.

В настоящее время во всем мире наметилась тенденция интенсивного использования альтернативных источников энергии, что породило дополнительные организационные проблемы: финансовые, нормативные и информационные. Чтобы как-то решить эти проблемы, была создана методология внедрения стандартов эффективности электростанций для выработки электроэнергии и сокращения потенциальных выбросов в окружающую среду [12; 13].

Таким образом, целью исследования является моделирование эффективного решения использования ВЭР в работе ПГУ.

1. Расчетные исследования. Предмет исследования

Рассмотрим в качестве примера энергоблок ПГУ-420Т «Мосэнерго», который был введен в эксплуатацию в декабре 2014 г. Это моноблок, в состав которого входят ГТУ SGT5-4000F и ПТУ SST-5000 производства Siemens, котел-утилизатор ЭМА-024КУ завода «Красный котельщик». ВЭР этого энергоблока представлены в табл. 1, из которой видно, что максимальная тепловая энергия ВЭР приходится на уходящие дымовые газы. Однако использование ВЭР от дымовых газов в настоящее время сопряжено с повышенным риском интенсивной коррозии теплообменных аппаратов (ТА) в зоне температур ниже 105 °С, где создаются благоприятные условия образования паров серной кислоты, взаимодействующие с металлом ТА.

В энергоблоке ПГУ-420Т в целях отвода тепловой энергии была применена схема замкнутого контура охлаждения оборудования (рис. 1). Отвод тепла от основного и вспомогательного оборудования происходит в охладителях, где охлаждающей средой является обессоленная вода замкнутого контура охлаждения. Система замкнутого контура охлаждения отводит все тепло, вырабатываемое оборудованием, в систему циркуляционного водоснабжения в теплообменниках замкнутого контура (ТЗК) [14].

В результате переданное тепло в количестве $Q_{ТЗК} \approx 6,4$ МВт утилизируется через градирню в

окружающую среду. Такой способ утилизации низкопотенциальной тепловой энергии приводит не только к снижению КПД энергоблока, но и к тепловому загрязнению окружающей среды. Поэтому напрашивается идея в тепловой схеме замкнуто-

го контура охлаждения оборудования заменить ТЗК на компрессионную теплонасосную установку (ТНУ), при помощи которой можно будет преобразовать низкопотенциальную тепловую энергию в высокопотенциальную.

Таблица 1

ВЭР энергоблока
 [Table 1. The secondary energy resources of the energy block]

ВЭР ПГУ [Secondary energy resources of the CCGT]	Температура T, °C [Temperature T, °C]	Q, МВт [MW]
Дымовые газы после КУ [Flue gases after the waste heat recovery unit]	110	37
Охлаждающая вода после газоохладителя генератора ПТУ [Cooling water after the gas coolers of the steam turbine unit]	40	1,29
Охлаждающая вода после газоохладителя генератора ГТУ [Cooling water after the gas coolers of the gas turbine unit]	46	2,63
Охлаждающая вода после маслоохладителя ПТУ [Cooling water after the oil coolers of the steam turbine unit]	40	0,88
Охлаждающая вода после маслоохладителя ГТУ [Cooling water after the oil coolers of the gas turbine unit]	43	1,47
Охлаждающая вода после маслоохладителя гидромуфт [Cooling water after the oil coolers of the hydraulic couplings]	36	0,36
Охлаждающая вода после охладителей грязного конденсата и выпара [Cooling water after the coolers of dirty condensate and vapor]	35	0,15
Охлаждающая вода после охладителей вакуумных насосов [Cooling water after the coolers of vacuum pumps]	36	0,18

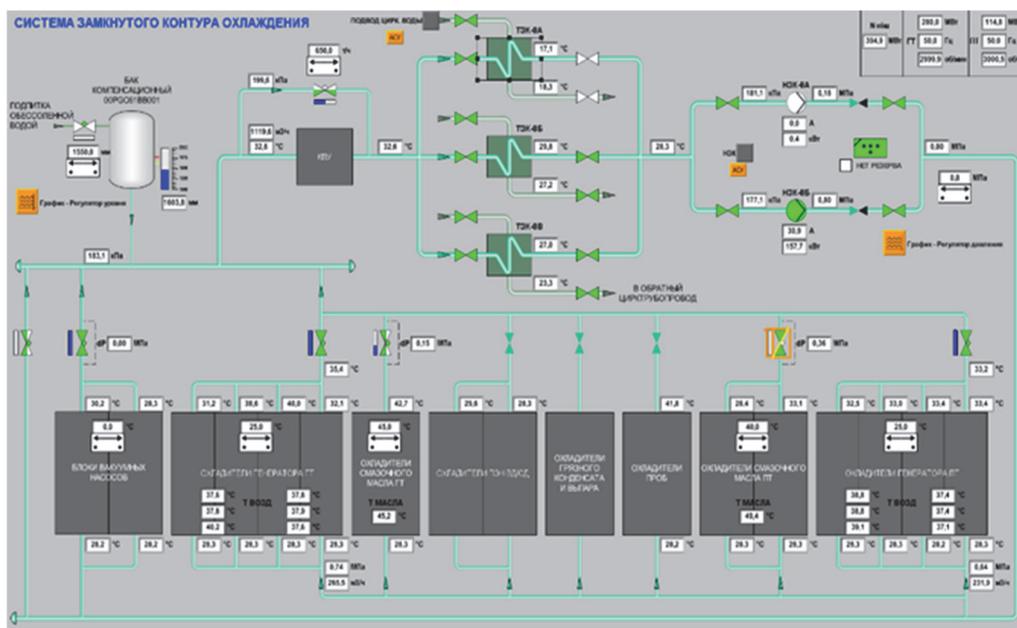


Рис. 1. Схема замкнутого контура охлаждения оборудования
 [Figure 1. Closed circuit diagram of the cooling equipment]

2. Особенности работы многоступенчатого ТНУ в тепловой схеме энергоблока ПГУ-420Т

Основополагающим принципом работы ТНУ является использование механической работы для перемещения тепла из области низко потенциального источника тепла (НПИТ) в область высокопотенциального источника тепла (ВПИТ). На рис. 2 изображены основные компоненты ТНУ: компрессор (1), конденсатор (2), редуктор (3) и испаритель (4). Компрессор повышает давление хладагента и, следовательно, его температуру, тем самым перемещая тепло из области НПИТ в область ВПИТ. При этом агрегатное состояние хладагента должно находиться в паровой фазе.

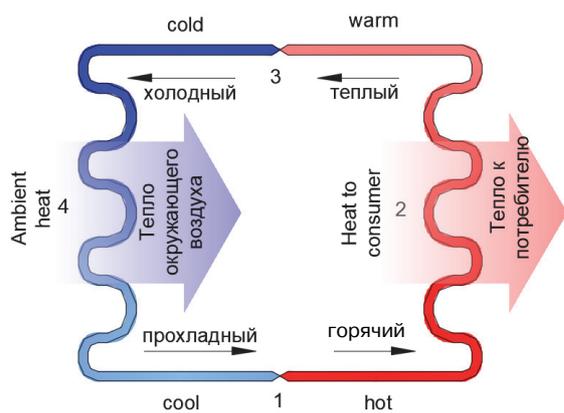


Рис. 2. Основные компоненты ТНУ
[Figure 2. The main components of a heat pump]

Конденсатор, представляющий собой рекуперативный теплообменник, отдает тепло хладагента потребителю в основном за счет фазового перехода последнего из парового состояния в жидкость. Редуктор необходим для понижения давления хладагента. При этом жидкая фаза хладагента переходит в состояние пара. Процесс этот протекает в испарителе, где тепло переходит от НПИТ к хладагенту. Испаритель конструктивно выполнен в виде рекуперативного теплообменника.

Термодинамика идеального цикла работы ТНУ представлена в виде диаграммы на рис. 3, который показывает изменение температуры и энтропии во время прохождения этого цикла. Диаграмма относительно колоколообразной кривой разбита на три области. В левой области относительно кривой хладагент находится в состоянии жидкой фазы. В правой области относительно этой кри-

вой хладагент находится в перегретом состоянии паровой фазы. В области под колоколообразной кривой хладагент находится в состоянии влажного пара, причем, количество доли жидкой фазы хладагента в направлении от левой стороны кривой к правой уменьшается по отношению доли паровой фазы от 1 до 0.

Идеальный цикл работы ТНУ на диаграмме изображен в виде замкнутого контура ABCDEA. Линия АВ отображает процесс адиабатного сжатия хладагента в компрессоре. Линия ВС отображает изобарный процесс охлаждения хладагента от перегретого состояния до состояния насыщения паров (С). Линия CD отображает процесс изотермического отвода теплоты от хладагента к потребителю за счет внутренней теплоты парообразования хладагента при переходе от состояния паровой фазы в состояние жидкой фазы. Линия DE отображает процесс дросселирования хладагента от давления хладагента в конденсаторе до давления в испарителе. Линия EA отображает процесс изотермического подвода теплоты от НПИТ к хладагенту за счет внутренней теплоты парообразования хладагента при переходе от состояния жидкой фазы в состояние паровой фазы.

Экономическая эффективность ТНУ определяется коэффициентом преобразования теплоты COP, равным отношению количества теплоты, переданной от НПИТ к ВПИТ, к работе, затраченной компрессором для нагнетания хладагента от НПИТ к ВПИТ.

Величина COP сильно зависит от разности температур между ВПИТ и НПИТ. Так, с увеличением этой разности COP будет падать. На величину COP также влияет химический состав хладагента. Например, у хладагента R-600a линия насыщенных паров лежит практически близко к адиабате АВ по сравнению, скажем, с хладагентом R-717, где градиент линии насыщения имеет отрицательное значение. Следовательно, работа сжатия по адиабате хладагента R-717 будет значительно больше по сравнению с работой сжатия хладагента R-600a при подъеме температуры хладагентов на одну и ту же величину, что приведет к снижению COP.

Все эти особенности работы ТНУ влекут определенные трудности в моделировании эффективно-го решения утилизации вторичных энергоресурсов ПГУ. Частично удалось решить данную проблему заменой одноступенчатой ТНУ на многоступенчатую, применяя технические решения, изложенные в работе [15].

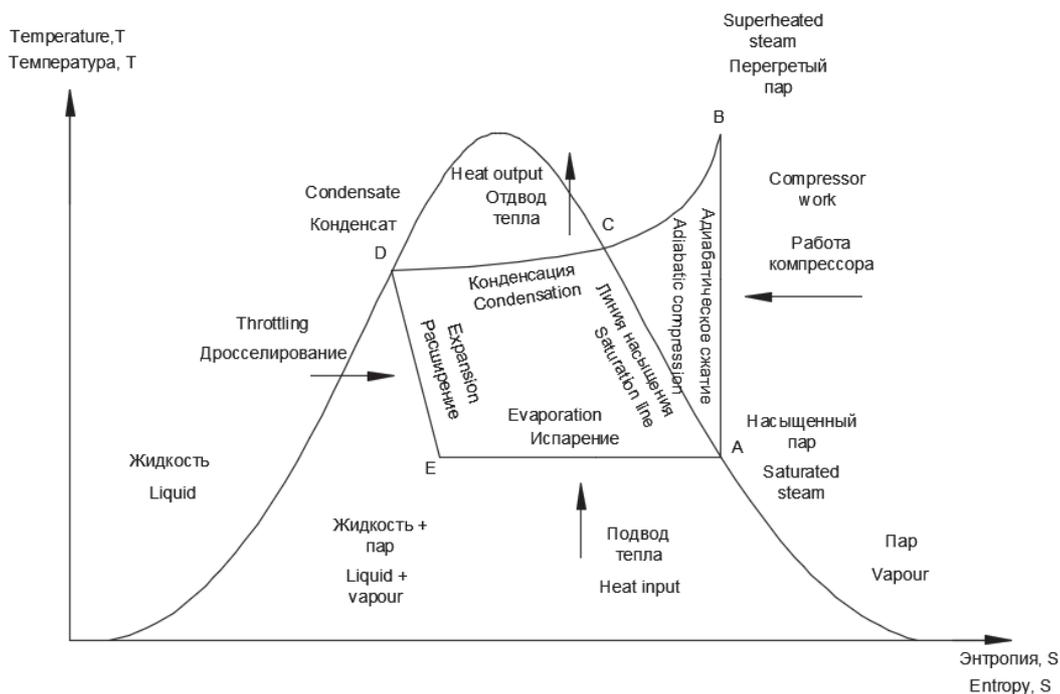


Рис. 3. T–S диаграмма термодинамического идеального цикла работы ТНУ
[Figure 3. T–S diagram of the thermodynamic cycle of a heat pump]

Таким образом, при замене ТЗК на ТНУ в роли потребителя может выступать как сырая вода, которую необходимо подогреть перед подачей на установки водоподготовки, так и обратная сетевая вода (ОСВ). Сетевая вода необходима для подачи горячей воды по прямой ветке сетевой воды (ПСВ) для нужд жилищно-коммунального хозяйства. В зависимости от климата, размера и величин тепловых мощностей веток сетевой воды температура ОСВ может варьировать в широком диапазоне.

3. Результаты расчета

Рассмотрим варианты моделирования эффективного решения подогрева обратной сетевой воды. Пусть температура обратной сетевой воды, которую необходимо подогреть до 75 °С, при самых неблагоприятных условиях будет равна 32,6 °С. С помощью одноступенчатой ТНУ утилизируем ВЭР в количестве $Q_{\text{ТЗК}} \approx 5,6$ МВт, направленный на подогрев обратной сетевой воды, по схеме, представленной на рис. 4.

Согласно выполненным расчетам в программе CoolPack и методикам [16; 17], используя в качестве рабочего тела хладагент R600a, коэффи-

циент преобразования COP для схемы с одноступенчатой ТНУ будет равен 6,82. Заменяем в тепловой схеме одноступенчатую ТНУ на двух-, трех- и четырехступенчатые. В качестве примера рассмотрим принцип работы трехступенчатой ТНУ (рис. 5), содержащей испаритель 1, три компрессора 3, 13 и 22, три конденсатора 4, 14 и 23, разделители жидкой и паровой фазы хладагента 7 и 17, переохладители жидкой фазы хладагента 8, 18 и 26 и редукторы 29, 30 и 31.

Хладагент из испарителя 1 поступает на вход компрессора 3. За компрессором сжатый хладагент поступает в полость 5 конденсатора 4, где происходит отбор теплоты через рекуперативный теплообменник 6. При этом за счет внутренней теплоты фазового перехода хладагента нагревается ОСВ до температуры насыщенных паров хладагента. Далее в разделительной колонке 7 жидкая фаза хладагента поступает в переохладитель 8, а паровая фаза хладагента поступает на вход второй ступени компрессора 13.

Жидкая фаза хладагента на выходе из переохладителя 8, проходя через редуктор 29, дросселируется до давления, равного давлению паровой фазы хладагента на входе в компрессор 3. При этом в испарителе 1 из-за низкого давления

жидкая фаза хладагента испаряется, в следствии чего теплота от ОСВ идет на образование паровой фазы хладагента. Аналогично первой ступени процесс нагрева ОСВ происходит на второй и третьей ступенях.

В схеме трехступенчатой ТНУ дополнительно размещены два регулятора уровня жидкой фазы хладагента в разделительных колонках 7 и 17, которые кинематически связаны с редукторами 28 и 32 соответственно. Такое выполнение регулирующего устройства позволяет избежать переполнения разделительных колонок жидкой фазой хладагента и попадания его на вход компрессоров 13 и 22. Так как в ТНУ обычно применяют поршневые компрессоры, то попадание жидкой фазы хладагента в рабочий цилиндр приведет к гидравлическому удару и разрушению поршневой группы. С другой стороны, снижение уровня жидкой фазы хладагента ниже предельно минимального может привести к срыву работы испарителя.

Таким образом, нагрев ОСВ происходит ступенчато, последовательно в переохладителях и конденсаторах каждой ступени соответственно. Такой ступенчатый нагрев ОСВ обеспечивает высокий COP по сравнению с одноступенчатой ТНУ.

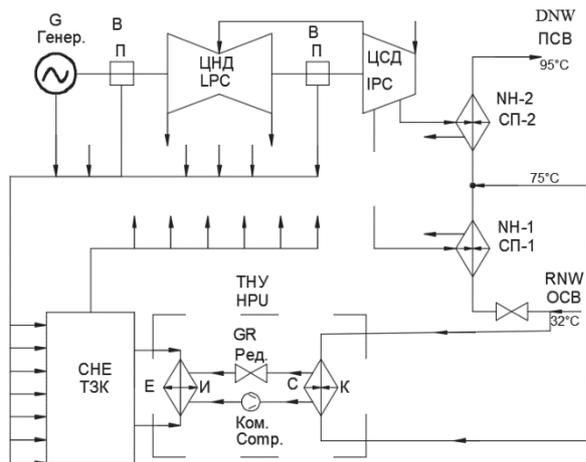


Рис. 4. Фрагмент схемы системы замкнутого контура охлаждения оборудования ПГУ-420Т с подключенной ТНУ: ТЗК – теплообменник замкнутого контура; ЦНД – цилиндр низкого давления; ЦСД – цилиндр среднего давления; П – подшипник; Генер. – генератор; СП-1 и СП-2 – сетевые подогреватели; ОСВ – обратная сетевая вода; ПСВ – прямая сетевая вода; И – испаритель; К – конденсатор; Ред. – редуктор; Ком. – компрессор
[Figure 4. Fragment of the closed circuit cooling system scheme of the CCGT-420T with an operating heat pump unit (HPU); SHE – closed-circuit heat exchangers; LPC – low pressure cylinder; IPC – intermediate pressure cylinder; B – bearing; G – generator; NH-1 and NH-2 – network heaters; DNW – direct network water; RNW – reverse network water; E – evaporator; C – condenser; GR – gear reducer; Comp. – compressor]

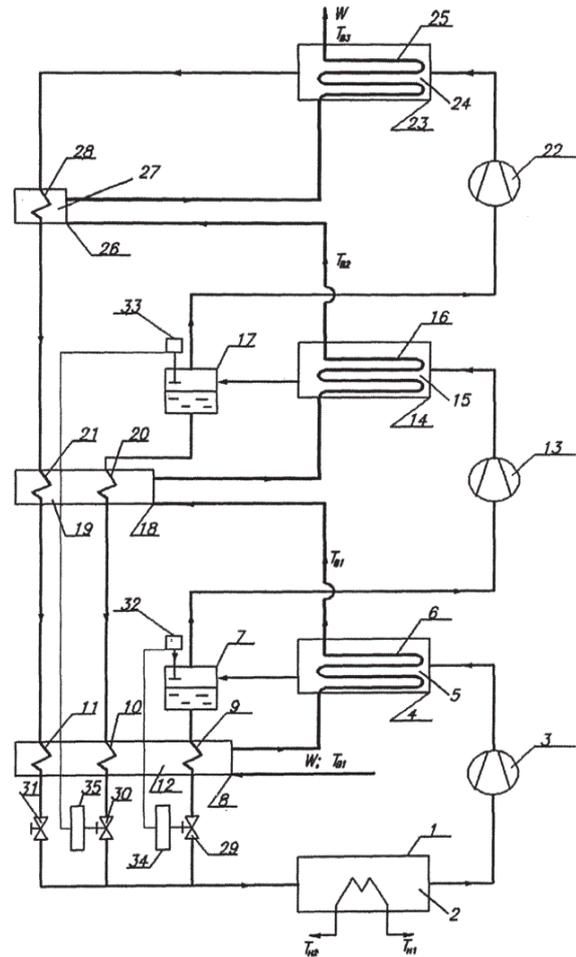


Рис. 5. Принципиальная схема модели трехступенчатой теплонасосной установки
[Figure 5. Schematic diagram of a two-stage heat pump unit model]

Как показали расчеты, применение в вышеуказанной модели вариантов с двух-, трех- и четырехступенчатой ТНУ, позволило получить COP, равные 9,37; 9,85 и 10,43 соответственно. Таким образом, утилизация ВЭР с тепловой производительностью $Q_{\text{ТЗК}} \approx 5,6$ МВт для одноступенчатой ТНУ потребует компрессор мощностью $W_1 = 821$ кВт; для двухступенчатой ТНУ – $W_2 = 597$ кВт; для трехступенчатой ТНУ – $W_3 = 567$ кВт; для четырехступенчатой ТНУ – $W_4 = 540$ кВт, что по отношению к одноступенчатой ТНУ составляет выигрыш двухступенчатой ТНУ в 27,2 %; двухступенчатой ТНУ – в 30,7 %; трехступенчатой ТНУ – в 34,6 %.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Следует отметить, что стоимость многоступенчатой ТНУ на единицу мощности в первом приближении не сильно отличается от одноступен-

чатой ТНУ, так как на единицу тепловой мощности ТНУ будет приходиться практически такие же трудозатраты и материалоемкости, что и в многоступенчатой ТНУ.

Подчеркнем также, что в случае применения предложенной модели эффективного решения использования ВЭР в энергоблоках мощностью свы-

ше 250 МВт, компрессоры необходимо выполнять в виде одновального многоступенчатого центробежного компрессора с промежуточными отборами хладагента и конденсаторами, расположенными непосредственно на корпусе компрессора. Такая компоновка ТНУ обеспечит низкую удельную металлоемкость на единицу мощности.

Таблица 2

Результаты расчета
[Table 2. Calculation results]

Количество ступней ТНУ [The number of stages in the HPU]	Одноступенчатая ТНУ [One-stage HPU]	Двухступенчатая ТНУ [Two-stage HPU]	Трехступенчатая ТНУ [Three-stage HPU]	Четырехступенчатая ТНУ [Four-stage HPU]
Мощность компрессора W_n , кВт [Compressor power W_n , kW]	821	597	567	540
$W_1 - W_n$, кВт [kW]	0	244	254	281
Экономия количества условного топлива за час*, т у. т./ч [Equivalent fuel saved per hour, ton f_e /hour]	0	0,030	0,0312	0,0346
Экономия количества условного топлива за год, т у. т./год [Equivalent fuel saved per year, ton f_e /year]	0	262,08	272,56	302,26
Экономия в рублях применения многоступенчатого ТНУ по отношению к одноступенчатому**, руб./год [Savings in rubles applying multi-stage heat pump with respect to the single-stage, rubles/year]	0	3606000	3750000	4159000

Примечания. * 1000 кВт/ч = 0,123 т у. т. ** 1 т у. т. = 215 долл. США = 13 760 руб.
[Notes. * 1000 kW/h = 0.123 f_e . ** 1 ton f_e = 215 USA dollars = 13 760 rubles.]

Заключение

Заменив в модели схемы пластинчатый ТЗК на испаритель ТНУ, можно направить это тепло на испарение хладагента. В конденсаторе осуществляется подогрев либо сырой воды, либо обратной сетевой воды. В первом случае результатом является экономия греющего пара, который в данный момент используется для подогрева сырой воды. Во втором случае результатом станет повышение температуры сетевой воды перед блочной теплофикационной установкой и, как следствие, повышение ее экономичности.

Применение многоступенчатой ТНУ можно использовать для подогрева как сырой, так и обратной сетевой воды одновременно. При этом замена одноступенчатой ТНУ, допустим, на четырехступенчатую позволит в течение годовой эксплуатации энергоблока ПГУ-420Т сэкономить 4 159 000 рублей.

Список литературы

1. История парогазового цикла в России. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/900-Istoriya-parogazovogo-cikla-v-Rossii-Perspektivy-razvitiya> (дата обращения: 25.05.2020 г.).
2. Современная теплоэнергетика. URL: https://ozlib.com/857603/tehnika/sovremennaya_teploenergetika (дата обращения: 25.05.2020 г.).
3. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ.
4. Мацевитый Ю.М., Чиркин Н.Б., Клепанда А.С. Об использовании тепловых насосов в мире и что тормозит их широкомасштабное внедрение в Украине // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 2. С. 2–17.
5. Молодкина М.А. Повышение технико-экономических показателей парогазовых тепловых электростанций путем утилизации низкопотенциальной теплоты с использованием тепловых насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 16 с.

6. Проценко В.П., Пустовалов С.Б., Савицкий А.И., Легуенко С.К. Атомно-теплонасосная теплофикация как новое направление в развитии энергетики // Энерго-снабжение и водоподготовка. 2010. № 1. С. 25–29.

7. Чиркин Н.Б., Кузнецов М.А., Шерстов Е.В., Стенников В.Н. Потенциальная возможность и техническая рациональность применения теплонасосных технологий при комбинированном производстве электрической и тепловой энергии // Теплопередача в машиностроительных конструкциях. Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17. № 1. С. 11–20.

8. Stanislav C. Low-temperature district heating distributed from transmission-distribution junctions to users: energy and environmental modelling // *Energy Procedia*. 2018. Vol. 147. Pp. 382–389.

9. Razin A., Mutasim B., Hossain M. Increasing the Efficiency of Steam Power Plant with the Help of Solar Energy // *Proceedings of International Conference in Developments in Renewable Energy Technology*. Dhaka, Bangladesh, 2012.

10. Le Ray G., Christensen M.H., Pinson P. Detection and Characterization of Domestic Heat Pumps // *IEEE PowerTech Conference*. Milan, Italy, 2019.

11. Czarnik M., Tylman M., Jaskulski M., Wawrzyniak P. Heat recovery with chemical heat pump // *Journal Chemical and Process Engineering*. 2019. Vol. 40. Pp. 273–279.

12. Mahlia T.M., Lim J.Y., Aditya L. Methodology for implementing power plant efficiency standards for power generation: potential emission reduction // *Clean Technology Environment Policy*. 2018. Vol. 20. Pp. 309–327.

13. Lopatin E. Cost of Heating Pump Systems in Russia // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020. Vol. 10. Pp. 219–223.

14. Шаталов И.К., Антипов Ю.А., Собенников Е.В., Камбиз С.В. Многоступенчатая теплонасосная установка повышенной эффективности // *Инженерные системы – 2015: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции* / под ред. Н.К. Пономарева. М.: РУДН, 2015. С. 541–546.

15. Staffell I., Brett D., Brandon N., Hawkes A. A review of domestic heat pumps // *Energy & Environmental Science*. 2012. Vol. 5. Pp. 9291–9306.

16. Патент на полезную модель 140197 РФ, МПК F25B30/00. Многоступенчатая теплонасосная установка / Ю.А. Антипов, И.К. Шаталов, Е.В. Собенников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов». № 2013117874/06; заявл. 18.04.2013; опубл. 10.05.2014.

17. Патент на изобретение 2705696 РФ, МПК F25B30/00, F25B1/10. Многоступенчатая теплонасосная установка / Ю.А. Антипов, И.К. Шаталов, А.В. Силин, К.В. Шкарин, Е.В. Собенников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов». № 2017102563; заявл. 26.01.2017; опубл. 25.01.2018.

Для цитирования

Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Шкарин К.В., Барыбина А.С., Огнева Я.А., Морозов П.Д. Моделирование эффективного решения утилизации вторичных энергоресурсов ПГУ на примере ПГУ-420Т // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2020. Т. 21. № 1. С. 27–35. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-27-35>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-27-35

Research paper

Modeling an effective method to utilize secondary energy resources of a combined cycle gas turbine based on the CCGT-420T

Yuri A. Antipov, Ivan K. Shatalov, Kirill V. Shkarin, Anna S. Barybina, Yana A. Ogneva, Pavel D. Morozov

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

Article history:

Received: April 13, 2020

Revised: May 24, 2020

Accepted: June 3, 2020

Nowadays, improving the efficiency of power plants by utilizing secondary energy resources is gaining more attention in the energy sector. In this paper, the combined cycle gas turbine (CCGT-420T) was considered, where exhaust heat from the main and auxiliary equipment is utilized, and sent to a water supply system through a closed-circuit heat exchanger, as a result, the heat transferred ($Q \approx 6.4$ MW) is rejected into the environment through a cooling tower. Moreover, an effective modelling method for utilizing heat in a closed cycle, using a steam compressing heat pump unit (HPU) is proposed. In addition,

Yuri A. Antipov, Associate Professor at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Ph.D., ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5598-7522>, rudn-tit@yandex.ru

Ivan K. Shatalov, Professor at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Ph.D., eLIBRARY SPIN-code: 1624-5017, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3781-3788>

Kirill V. Shkarin, Assistant at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University, eLIBRARY SPIN-code: 4599-9150, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5680-517X>

Anna S. Barybina, 2nd year master student in the field of "Power Engineering" at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

Yana A. Ogneva, 2nd year master student in the field of "Power Engineering" at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

Pavel D. Morozov, 2nd year master student in the field of "Power Engineering" at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

Keywords:

heat pump units, HPU, combined cycle gas turbine, CCGT, utilization, secondary energy resources, energy efficiency, modeling

a calculation of the effectiveness of utilizing secondary energy resources depending on the number of HPU stages. In addition, the calculation of the effectiveness of the use of secondary energy resources depending on the number of stages of HPU was carried out. Several options of the model were discussed in this work, such as, two-, three-, and four-stage HPU and the coefficient of performance was calculated. Moreover, the work of these compressors for each option of the model was discussed in this work. Finally, the economic benefits of using of a multi-stage HPU instead of a traditional one-stage HPU during the annual operation of the CCGT-420T was discussed.

References

1. Istoriya parogazovogo tsikla v Rossii [History of the combined cycle in Russia]. Available from: <http://www.combienergy.ru/stat/900-Istoriya-parogazovogo-tsikla-v-Rossii-Perspektivy-razvitiya> (accessed: May 25, 2020). (In Russ.)
2. Sovremennaya teploenergetika [Modern heat power engineering]. Available from: https://ozlib.com/857603/tehnika/sovremennaya_teploenergetika (accessed: May 25, 2020). (In Russ.)
3. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoi effektivnosti i o vnesenii izmenenii v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii [On Energy Saving and on Improving Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation]: Federal Law of November 23, 2009 No. 261-FZ]. (In Russ.)
4. Matsevityi YuM, Chirkin NB, Klepanda AS. Ob ispol'zovanii teplovykh nasosov v mire i chto tormozit ikh shirokomasshtabnoe vnedrenie v Ukraine [On the use of heat pumps in the world and what inhibits their large-scale implementation in Ukraine]. *Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit [Energy Saving. Energy. Energy Audit]*. 2014;2:2–17. (In Russ.)
5. Molodkina MA. *Povyshenie tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei parogazovykh teplovykh elektrostantsii putem utilizatsii nizkopotentsial'noi teploty s ispol'zovaniem teplovykh nasosov [Improving the technical and economic indicators of combined cycle thermal power plants by utilizing low-grade heat using heat pumps]*: abstract of dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Saint Petersburg; 2012. (In Russ.)
6. Protskno VP, Pustovalov SB, Savitsky AI, Leguenko SK. Atomno-teplonasosnaya teplofikatsiya kak novoe napravlenie v razvitii energetiki [Nuclear and heat pump heating as a new direction in the development of energy]. *Energosnabzhenie i vodopodgotovka [Energy Supply and Water Treatment]*. 2010;1:25–29. (In Russ.)
7. Chirkin NB, Kuznetsov MA, Sherstov EV, Stenikov VN. Potentsial'naya vozmozhnost' i tekhnicheskaya ratsional'nost' primeneniya teplonasosnykh tekhnologii pri kombinirovannom proizvodstve elektricheskoi i teplovoi energii [The potential and technical rationality of the use of heat pump technologies in the combined production of electric and thermal energy]. *Teploperedacha v mashinostroitel'nykh konstruksiyakh. Problemy mashinostroeniya [Heat transfer in engineering structures. Problems of engineering industry]*. 2014;17:11–20. (In Russ.)
8. Stanislav C. Low-temperature district heating distributed from transmission-distribution junctions to users: energy and environmental modelling. *Energy Procedia*. 2018;147:382–389.
9. Razin A, Mutasim B, Hossain M. Increasing the Efficiency of Steam Power Plant with the Help of Solar Energy. *Proceedings of International Conference in Developments in Renewable Energy Technology*. Dhaka, Bangladesh, 2012.
10. Le Ray G, Christensen MH, Pinson P. Detection and Characterization of Domestic Heat Pumps. *IEEE PowerTech Conference*. Milan, Italy, 2019.
11. Czarnik M, Tylman M, Jaskulski M, Wawrzyniak P. Heat recovery with chemical heat pump. *Journal Chemical and Process Engineering*. 2019;40:273–279.
12. Mahlia TM, Lim JY, Aditya L. Methodology for implementing power plant efficiency standards for power generation: potential emission reduction. *Clean Technology Environment Policy*. 2018. Vol. 20. Pp. 309–327.
13. Lopatin E. Cost of Heating Pump Systems in Russia. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020;10:219–223.
14. Shatalov IK, Antipov YA, Sobennikov EV, Kambiz SV. Mnogostupenchataya teplonasosnaya ustanovka povyshennoi effektivnosti [Multistage heat pump unit of increased efficiency]. *Inzhenernye sistemy – 2015 [Engineering Systems – 2015]: proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RUDN University; 2015. p. 541–546. (In Russ.)
15. Staffell I, Brett D, Brandon N, Hawkes A. A review of domestic heat pumps. *Energy & Environmental Science*. 2012;5:9291–9306.
16. Antipov YA, Shatalov IK, Sobennikov EV. *Mnogostupenchataya teplonasosnaya ustanovka [Multistage heat pump installation]*: utility model patent 140197 RF, IPC F25B30/00. Applicant and patent holder – Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). No. 2013117874/06; declared April 18, 2013; published May 10, 2014. (In Russ.)
17. Antipov YA, Shatalov IK, Silin AV, Shkarin KV, Sobennikov EV. *Mnogostupenchataya teplonasosnaya ustanovka [Multistage heat pump installation]*: patent for invention 2705696 RF, IPC F25B30/00, F25B1/10. Applicant and patent holder – Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). No. 2017102563; declared January 26, 2017; published January 25, 2018. (In Russ.)

For citation

Antipov YuA, Shatalov IK, Shkarin KV, Barybina AS, Ogneva YaA, Morozov PD. Modeling an effective method to utilize secondary energy resources of a combined cycle gas turbine based on the CCGT-420T. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):27–35. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-27-35> (In Russ.)



НАУКИ О ЗЕМЛЕ EARTH SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-36-47
УДК 69.051

Научная статья

Выбор площадок для строительства пунктов захоронения радиоактивных отходов

Н.С. Панкратов

Московская областная строительная центральная научно-исследовательская лаборатория,
Российская Федерация, 123592, Москва, ул. Кулакова, д. 20, стр. 1Л
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

В.В. Белов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

История статьи:

Поступила в редакцию: 7 мая 2020 г.
Доработана: 13 мая 2020 г.
Принята к публикации: 18 мая 2020 г.

Ключевые слова:

выбор площадки, радиоактивные отходы, РАО, приповерхностные пункты захоронения радиоактивных отходов, ПЗРО, геоинформационный анализ, ГИС-анализ, принципы ALARA, ранжирование площадок, обращение с отходами

В статье рассматриваются вопросы выбора площадок для строительства ядерных установок, пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) и других объектов использования атомной энергетики. Обзор современных подходов к выбору площадок для размещения приповерхностных ПЗРО показывает, что системные исследования в данной тематике представлены неполно и в основном направлены на решение задач инженерно-геологического характера для района размещения, а также выбора материалов барьеров инженерной защиты. В данной работе на примере ПЗРО выполнен обзор требований, содержащихся в нормативных документах РФ и Международного агентства по атомной энергетике в области выбора площадок. Предложены дополнения к методике по выбору площадок для строительства пунктов захоронения отходов низкой и средней активности, основанные на системном и геоинформационном (ГИС) анализе, принципах ALARA, методе взвешенных оценок критериев и их попарных сравнений. Многокритериальность задачи выбора площадок предложено описывать ГИС-анализом данных с нанесением соответствующих ограничивающих и предпочтительных условий непосредственно на карту местности, что продемонстрировано на примере выбора площадок для комплексов ПЗРО. Учет необходимых требований, предъявляемых на различных этапах жизненного цикла, и их значимость могут быть оценены методом взвешенных оценок и попарных сравнений с последующим их внесением в ГИС-анализ. Такой подход позволяет рациональным образом, с соблюдением всех необходимых нормативов проводить выбор подходящих вариантов размещения потенциальных площадок с учетом жизненного цикла объекта.

Введение

К настоящему времени в России накоплено свыше 500 млн м³ радиоактивных отходов (РАО),

более 90 % из них представлены короткоживущими отходами средней удельной активности (САО), а также коротко- и долгоживущими отходами с низкой удельной активностью (НАО) [1].

В структуре образования большую часть занимают отходы, связанные с обслуживанием, ремонтом, выводом из эксплуатации и ликвидацией АЭС, размещающиеся в пристанционных хранилищах, многие из которых на сегодняшний день уже заполнены [2].

Панкратов Николай Сергеевич, консультант испытательной лаборатории МособлстройЦНИЛ, магистр кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики НИУ МГСУ, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0075-6185>, pankratovnic@mail.ru

Белов Вячеслав Васильевич, доцент кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики НИУ МГСУ, кандидат технических наук, eLIBRARY SPIN-код: 6936-1160.

© Панкратов Н.С., Белов В.В., 2020

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

Прогноз до 2025 года, выполненный ГК «Росатом», показывает существенное увеличение объема образования РАО в различных федеральных округах РФ, что обусловлено выводом из эксплуатации отработавших энергоблоков существующих АЭС. При этом захоронение планируется производить в приповерхностных пунктах захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) [1].

На данный момент в РФ функционирует только один такой пункт, расположенный в Свердловской области, и требуется строительство новых ПЗРО, поэтому выбор площадок для них является весьма актуальной задачей.

Анализ большинства существующих научных исследований, посвященных выбору площадок [3–6], показывает, что они преимущественно ориентированы на изучение инженерно-геологических условий, упуская часть важных критериев с учетом жизненного цикла объекта, таких как социальные, ресурсные, логистические, и ряд факторов безопасности.

В настоящий момент не существует единого общепринятого подхода. Зачастую решение о размещении ПЗРО принимается исходя из политических или чисто экономических соображений, без перспективного комплексного рассмотрения данного вопроса, что приводит к серьезным последствиям в будущем, наглядный тому пример – шахта АССЭ-II (Германия). Поэтому остро стоит необходимость в систематизации имеющихся

исследований с разработкой единой методики выбора площадок.

1. Цель статьи

На примере комплексов ПЗРО систематизировать подход к анализу данных при выборе площадок для размещения объектов с высоким уровнем радиоактивной опасности.

Разработать дополнение к существующим методикам выбора площадок для размещения комплексов приповерхностных пунктов захоронения радиоактивных отходов.

2. Результаты и обсуждение

Используя системный анализ, концептуальную схему реализации методики выбора площадки для размещения объектов с высоким уровнем опасности (на примере комплексов ПЗРО) можно представить в виде трех последовательных этапов (рис. 1).

Варианты площадок на первом этапе формируются путем учета всех необходимых нормативных требований, предъявляемых к площадкам размещения объектов с повышенным уровнем опасности, которые для комплексов ПЗРО делятся на две основные группы – ограничивающие и предпочтительные (табл. 1). Затем последовательным наложением данных групп требований на единую карту формируется выборка потенциально пригодных зон для размещения будущих площадок (геоинформационный анализ).



Рис. 1. Концептуальная схема реализации методики выбора площадки для размещения объектов с повышенным уровнем опасности (на примере комплексов ПЗРО)

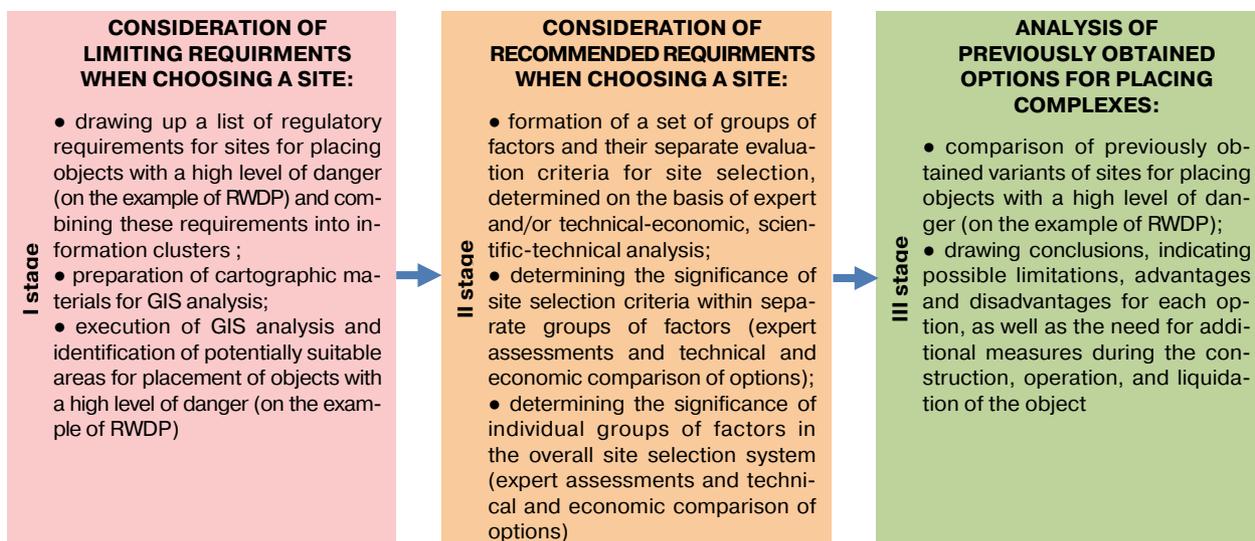


Figure 1. Conceptual scheme of implementation of the methodology for selecting a site for placing objects with a high level of danger (on the example of RWDP)

Таблица 1

Требования, предъявляемые к площадкам для размещения комплексов ПЗРО, составленные с учетом существующей нормативной базы [7–12]

[Table 1. Requirements for sites for the placement of RWPDP, based on the existing regulatory framework [7–12]]

№ [No.]	Требования к площадке [8] [Requirements for the site [8]]	Тип [Type]	Регламентирующий нормативный документ [Regulatory document]
1	«Не допускается размещать ПЗРО на территориях, в пределах которых размещение запрещено законодательством, в том числе природоохранным» [“It is not allowed to place RWDP in territories within which placement is prohibited by the legislation, including environmental protection”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 48; НП-060-05, п. 3.1,*1 [NP-055-14, p. 48; NP-060-05, p. 3.1,*1]
2	«Не допускается размещать ПЗРО на площадках, расположенных непосредственно на активных разломах или в активных геодинамических зонах» [“It is not allowed to place RWDP on sites located directly on active faults or in active geodynamic zones”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 48; НП-060-05, п. 3.1,*2; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.7 [NP-055-14, p. 48; NP-060-05, p. 3.1,*2; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.7]
3	«Не допускается размещать ПЗРО на площадках, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью максимального расчетного землетрясения, превышающей 8 баллов по шкале MSK-64» [“It is not allowed to place RWDP on sites whose seismicity is characterized by the intensity of the maximum calculated earthquake exceeding 8 points on the MSK-64 scale”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 48; НП-060-05, п. 3.1,*3; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.7 [NP-055-14, p. 48; NP-060-05, p. 3.1,*3; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.7]
4	«Не допускается размещать ПЗРО на территории, подверженной воздействию действующих вулканов, и на территории проявления активного грязевого вулканизма» [“It is not allowed to place RWDP on the territory exposed to active volcanoes, and on the territory of active mud volcanism”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 48; НП-060-05, п. 3.1,*6; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.7 [NP-055-14, p. 48; NP-060-05, p. 3.1,*6; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.7]

Продолжение табл. 1
[Table 1, continuation]

№ [No.]	Требования к площадке [8] [Requirements for the site [8]]	Тип [Type]	Регламентирующий нормативный документ [Regulatory document]
5	«Размеры площадки ПЗРО должны обеспечить размещение всех необходимых сооружений, предназначенных для обращения с РАО» [“The size of the RWDP site should ensure the placement of all necessary facilities intended for the management of RW”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 51; [NP-055-14, p. 51]
6	«Площадка для размещения приповерхностного ПЗРО должна располагаться предпочтительно в пределах положительных элементов рельефа, характеризоваться низким уровнем грунтовых вод, не подвергаться затоплению, не находиться в прибрежной зоне, в поймах рек и в болотистой местности» [“The site for the placement of near-surface RWDP should preferably be located within the positive elements of the terrain, characterized by a low level of ground water, not subject to flooding, not located in the coastal zone, in floodplains of rivers and in swampy areas”]	предпочтительный [preferred]	НП-055-14, п. 52; ГОСТ Р 52037-2003; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.4–6.5, 6.9 [NP-055-14, p. 52; GOST R 52037-2003; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.4–6.5, 6.9]
7	«Не допускается размещение приповерхностных ПЗРО на площадке с выраженными признаками протекания поверхностных геологических процессов (например, эрозия, оседание, оползни, карст)» [“It is not allowed to place near-surface RWDP on a site with pronounced signs of surface geological processes (for example, erosion, subsidence, landslides, karst)”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 52; НП-060-05, п. 3.1,*4; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.8 [NP-055-14, p. 52; NP-060-05, p. 3.1,*4; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.8]
8	«Вмещающие породы должны быть представлены одним из потенциально пригодных типов (кристаллические магматические или метаморфические породы, в том числе граниты, гнейсы, туфы, предпочтительно основного или ультраосновного состава; каменная соль или ангидрит; глины), должны иметь достаточный объем, залегать на приемлемой глубине и обладать благоприятными физико-механическими свойствами, однородной структурой и низкой трещиноватостью» [“The host rocks must be of one of the potentially suitable types (crystalline igneous or metamorphic rocks, including granites, gneisses, tufts, preferably of basic or ultra-basic composition; rock salt or anhydrite; clays), must have sufficient volume, lie at an acceptable depth and have favorable physical and mechanical properties, uniform structure and low fracturing”]	предпочтительный [preferred]	НП-055-14, п. 53; Нормы МАГАТЭ по безопасности, № SSR-5 2007, п. 5.9.; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.3–6.6 [NP-055-14, p. 53; IAEA Safety Standards No. SSR-5 2007, p. 5.9; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.8]
9	«Целесообразно размещение площадки в районах, не испытывающих интенсивные тектонические движения» [“It is advisable to place the site in areas that do not experience intense tectonic movements”]	предпочтительный [preferred]	НП-055-14, п. 53; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.7 [NP-055-14, p. 53; IAEA Safety Standards No. SSR-5 2007, p. 5.9]
10	«Массив горных пород не должен содержать водоносных горизонтов, линз подземных вод или трещиноватых зон, по которым возможны водоприток в горные выработки и их затопление» [“The rock mass must not contain aquifers, underground water lenses, or fractured zones that may lead to water flows into the mine workings and their flooding”]	ограничивающий [limiting]	НП-055-14, п. 53; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.4–6.5, 6.9 [NP-055-14, p. 53; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.4–6.5, 6.9]

Окончание табл. 1
[Table 1, ending]

№ [No.]	Требования к площадке [8] [Requirements for the site [8]]	Тип [Type]	Регламентирующий нормативный документ [Regulatory document]
11	«Не допускается размещать ПЗРО на территории, подверженной воздействию цунами, катастрофических паводков или наводнений» [“It is not allowed to place RWDP on the territory affected by tsunamis, catastrophic high waters or floods”]	ограничивающий [limiting]	НП-060-05, п. 3.1,*5; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.9–6.10 [NP-060-05, p. 3.1,*5; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.9–6.10]
12	«Не допускается размещать ПЗРО на территории, которая может быть затоплена волной прорыва напорного фронта водохранилищ при разрушении плотин, расположенных вверх по течению реки от ПЗРО» [“It is not allowed to place RWDP on the territory that may be flooded by the wave of breaking the pressure front of reservoirs when the dams located upstream from the RWDP are destroyed”]	ограничивающий [limiting]	НП-060-05, п. 3.1,*7; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.11 [NP-060-05, p. 3.1,*7; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.11]
13	«Не допускается размещать ПЗРО в зонах схода селевых потоков и снежных лавин и в районах развития активных оползневых и других опасных склоновых процессов» [“It is not allowed to place RWDP in areas of mudslides and snow avalanches and in areas of active landslide and other dangerous slope processes”]	ограничивающий [limiting]	НП-060-05, п. 3.1,*8; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.10 [NP-060-05, p. 3.1,*8; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.11]
14	«Не допускается размещать ПЗРО на склонах с уклоном 15° и более» [“It is not allowed to place RWDP on slopes with an incline of 15° or more”]	ограничивающий [limiting]	НП-060-05, п. 3.1,*9 [NP-060-05, p. 3.1,*9]
15	«Не допускается использование мест, в которых ведут или будут вести добычу полезных ископаемых» [“It is not allowed to use places where mining is or will be conducted”]	ограничивающий [limiting]	ГОСТ Р 52037-2003; Требования МАГАТЭ, STI/PUB/1073, № WS-R-1, п. 6.3 [GOST R 52037-2003; IAEA requirements, STI/PUB/1073, No. WS-R-1, p. 6.3]
16	«Места размещения могильников должны быть удалены от населенных районов, мест отдыха населения, открытых водоемов и водопроводных магистралей» [“Burial sites should be located away from populated areas, public recreation areas, open reservoirs, and water mains”]	предпочтительный [preferred]	ГОСТ Р 52037-2003 [GOST R 52037-2003]
17	«Не рекомендуется использовать места, где возможны демографические изменения, связанные с увеличением численности населения, или есть перспектива использования данной территории» [“It is not recommended to use places where there may be demographic changes associated with an increase in the population, or there is a prospect of using this territory”]	ограничивающий [limiting]	ГОСТ Р 52037-2003 [GOST R 52037-2003]
18	«Следует отдавать предпочтение площадкам, расположенным на малонаселенных территориях и имеющим устойчивый ветровой режим» [“Preference should be given to sites located in sparsely populated areas and have a stable wind regime”]	предпочтительный [preferred]	СП 2.6.1.2612-10 [SP 2.6.1.2612-10]

Структура ГИС-слоев для пространственного анализа
 [Table 2. Structure of GIS layers for spatial analysis]

№ [No.]	Карта [Map]	Возможный источник данных [Possible data source]	Цель анализа [Purpose of analysis]
1	Карта инфраструктуры минерально-сырьевого комплекса [Map of the infrastructure of the mineral resource complex]	ГИС-Атлас «Недра России» The GIS Atlas "Depths of Russia"	Формирование пула территорий, потенциально пригодных (с точки зрения нормативной базы) для размещения объектов повышенного уровня опасности [Creating a pool of territories that are potentially suitable (from the point of view of the regulatory framework) for the placement of high-risk objects]
2	Географическая карта [Geographical map]		
3	Карта особо охраняемых территорий [Map of specially protected territories]		
4	Инженерно-экологическая карта [Engineering and environmental map]		
5	Карта месторождений полезных ископаемых [Map of mineral deposits]		
6	Геологическая карта дочетвертичных отложений [Geological map of pre-Quaternary deposits]		
7	Тектоническая карта [Tectonic map]		
8	Карта сейсмического районирования [The map of seismic zoning]		
9	Карта экзогенных геологических процессов [Map of exogenous geological processes]		
10	Карты административно-территориального деления субъектов ЦФО [Maps of administrative divisions of subjects of the Central Federal district]		
11	Публичная кадастровая карта [Public cadastral map]		

Таким образом, на I этапе анализ и выявление потенциально пригодных площадок осуществляется по 18 основным критериям оценки. Пространственный анализ проводится на основе карт, формирующих ГИС-слои (табл. 2).

Учет обязательных требований на I этапе позволяет сформировать набор потенциально пригодных территорий для размещения объектов с повышенным уровнем опасности, а также обеспечить необходимыми исходными данными последующую технико-экономическую и экспертную оценки, которые, очевидно, следует производить с учетом всего жизненного цикла объекта и особенностей самого проектного решения. Так, при реализации проектов с большими объемами работ в условиях экологических ограничений (например, площадки Челябинской области [13]) требуется наличие трудового ресурса, к которому предъявляются требования (помимо квалификации) к общему состоянию здоровья, сле-

довательно, пул людей, занятых в строительстве вблизи предполагаемой площадки, следует подвергнуть критическому анализу на предмет их общего состояния здоровья, поэтому в данном случае критерий «наличие трудовых ресурсов в регионе» [14] не может стать определяющим при выборе площадки. Аналогичным образом дело обстоит и с планируемой перспективой переработки радиоактивных отходов. Предполагая, что в будущем будут доступны технологии полной переработки радиоактивных отходов, площадки следует выбирать, по возможности, ближе к уже расположенным объектам схожей группы (образующих в результате производства или хранящих данный тип отходов), учитывая при этом возможное размещение на сопоставимом расстоянии от них комплекса по переработке.

II этап реализации методики выбора площадок в первом приближении можно представить как последовательный технико-экономический и/или

экспертный анализ циклического типа с формированием пула критериев, объединенных в соответствующие группы (глобального и локального характера), для последующего сравнения вариантов с учетом особенностей проекта и жизненного цикла объекта преимущественно с использованием ГИС-анализа.

Формирование критериев оценки производится путем критического анализа ресурсной составляющей проекта на этапах жизненного цикла объекта, а также косвенных требований безопасности, включая экологические. Применительно к комплексам ПЗРО, набор критериев экспертной оценки предлагается основывать на принципе ALARA (As Low As Reasonably Achievable) и данных о мировом опыте выбора площадок для строительства ПЗРО, а именно:

- *критерий 1* – расстояние от площадки до ближайших населенных пунктов, м;
- *критерий 2* – численность населения в радиусе 3 км;
- *критерий 3* – расстояние до объектов гидрографической сети, м;
- *критерий 4* – отсутствие особо охраняемых природных территории, зон охраны объектов культурного наследия в радиусе 5 км;
- *критерий 5* – количество опасных объектов в радиусе 5 км;
- *критерий 6* – наличие транспортной инфраструктуры и расстояние до нее в км, а также ее пропускная способность (количество полос для движения в одну сторону);
- *критерий 7* – среднее расстояние до источников образования (накопления) РАО, км;
- *критерий 8* – площадь землеотвода, км.

Выбор критериев основан на ресурсно-логистических принципах с учетом всего жизненного цикла объекта, учитывающих в том числе возможную переработку отходов и последующую ликвидацию объекта хранения, и принципах экологической безопасности и влияния соседних объектов (предприятий) на комплекс ПЗРО, учитывающих наличие высоких требований, предъявляемых к качеству выполняемых работ (операций) на всех этапах жизненного цикла объекта, которые закреплены путем соответствующих профессиональных стандартов, что выносит требования безопасности на первый план, превалируя над социально-экономическими критериями выбора и запуская в полной мере механизм HR-менеджмента [15].

Выбор площадки – многокритериальная задача, и предпочтительность того или иного варианта не может быть охарактеризована каким-либо одним фактором. Самым распространенным методом решения подобных задач является взвешенная сумма критериев (метод анализа иерархий) [16], когда варианты сравниваются по предпочтительности на основе сопоставления взвешенной суммы критериев, которые при необходимости нормализуются (1).

$$F(f|w) = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \dots + w_n f_n, \quad (1)$$

где w_i – весовые коэффициенты, предназначенные для учета разной относительной важности критериев (в сумме равные 1, показывают долю вклада того или иного критерия в общую систему оценки); f_i – критерий оценки в количественном выражении в единых единицах измерения, то есть с приведением их к сопоставимому виду (нормализацией); n – критерий, учитываемый в оценке (1, 2, ..., n).

Вариант считается наиболее предпочтительным при больших значениях весового индекса (суммы с учетом веса критерия в общей оценке).

Оценка согласованности выбранных критериев с учетом назначенного им веса, выполняется попарным взвешиванием всех критериев между собой, после чего данные заносятся в матричную форму (табл. 3).

Сравнение по табл. 3, как правило, осуществляется на основании экспертных оценок. Проводится расчет среднего арифметического значения в каждой строке таблицы. Определяются компоненты нормализованного вектора приоритетов (НВП). Выполняется проверка согласованности критериев путем расчета трех характеристик: собственного значения матрицы, индекса согласованности, отношения согласованности (2)–(4) [15].

$$\lambda_{\max} = f'_1 * \frac{a_1}{\sum_{i=1}^n a_i} + f'_2 * \frac{a_2}{\sum_{i=1}^n a_i} + \dots + f'_n * \frac{a_n}{\sum_{i=1}^n a_i}, \quad (2)$$

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (3)$$

$$\text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{\text{ПСС}}, \quad (4)$$

где a_i – сумма всех среднеарифметических значений f_i ($f_1, f_2, f_3 \dots f_n$); n – число учитываемых

критериев ($n = 1, 2, 3 \dots 8$); ПСС – показатель случайной согласованности, определяемый для случая, когда оценки в матрице представлены случайным образом, и зависящий только от размера матрицы [16].

Оценки в матрице считаются согласованными, если $OC \leq 10-15\%$, в противном случае их следует пересмотреть [16].

Описанная методика использована для предварительной оценки потенциально пригодной тер-

ритории размещения комплексов ПЗРО в РФ (рис. 2).

По результатам проведенного ГИС-анализа было получено 52 участка с потенциально пригодной территорией для размещения комплексов ПЗРО. Анализ II этапа, основанный на принципах ALARA, показан на примере Центрального федерального округа РФ, в котором определено пять наиболее вероятных мест для промежуточного хранения низкоактивных отходов (рис. 3).

Таблица 3

Форма таблицы попарного сравнения критериев
 [Table 3. Form of the table of pairwise comparison of criteria]

	f_1'	f_2'	...	f_n'	Среднее арифметическое значение [Arithmetic average]	НВП [NVP]
f_1'	1					
f_2'		1				
...			1			
f_n'				1		
ИТОГО [TOTAL]						
λ_{max}						
ИС [IC]						
ОС [CR]						

Примечание: ИС – индекс согласованности; ОС – отношение согласованности; НВП – нормализованный вектор приоритетов; λ_{max} – собственное значение матрицы.

[Note: IC – the index of consistency; CR – the consistency ratio; NVP – the normalized vector of priorities; λ_{max} – eigenvalue of the matrix.]

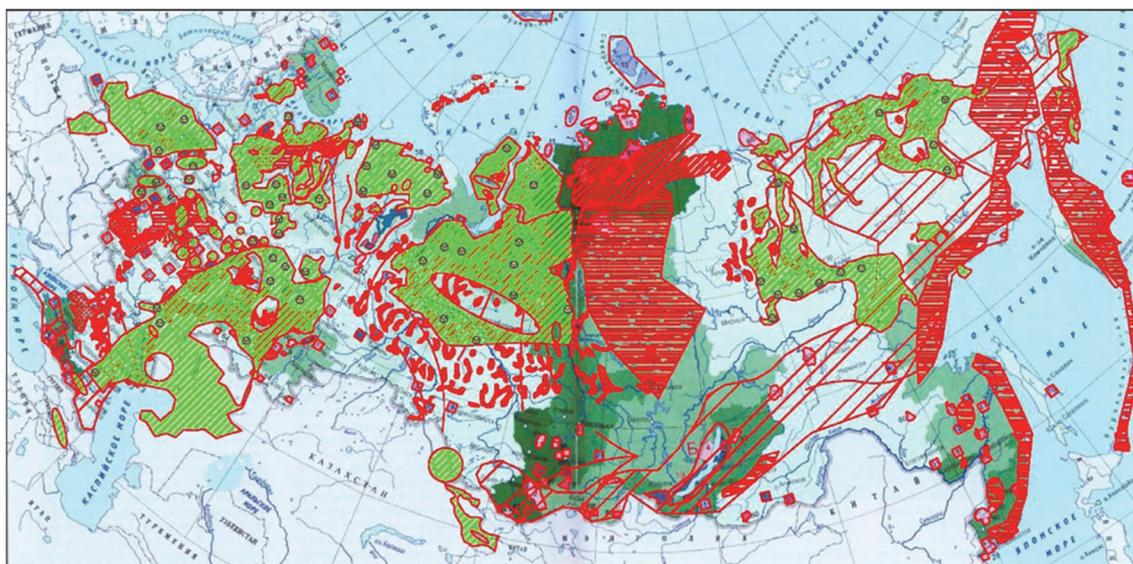


Рис. 2. Карта потенциально пригодных площадок для размещения комплексов ПЗРО на территории РФ, полученная путем реализации I этапа предлагаемой методики оценки:

▨ – размещение ПЗРО запрещено нормативными требованиями; ▨ – потенциально пригодные участки для размещения ПЗРО; ☣ – возможное местоположение ПЗРО

[Figure 2. A map of potentially suitable sites for placing RWDP on the territory of the Russian Federation obtained by implementing the I stage of the proposed assessment methodology:

▨ – placement of RWDP is prohibited by regulatory requirements; ▨ – potentially suitable sites for placement of RWDP; ☣ – possible location of RWDP]

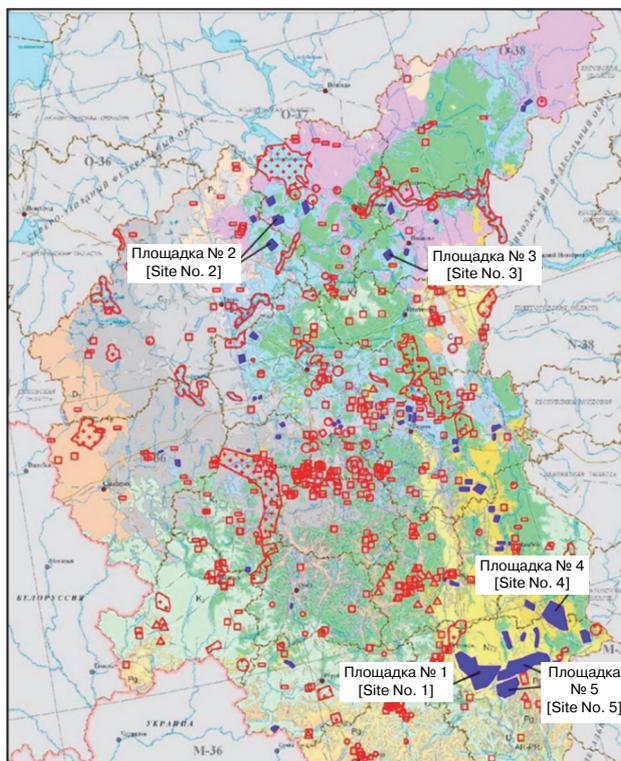


Рис. 3. Карта потенциально пригодных площадок для размещения комплексов ПЗРО на территории Центрального федерального округа РФ, полученная путем реализации II этапа предлагаемой методики оценки:

[Figure 3. A map of potentially suitable sites for placing RWDP in the Central Federal district of the Russian Federation obtained by implementing the II stage of the proposed assessment methodology:
■ – потенциально пригодные площадки
■ – potentially suitable sites]

Таблица 4

Результаты оценки потенциально пригодных площадок для размещения комплексов ПЗРО
[Table 4. Results of evaluating potentially suitable sites for placing RWDP]

	Площадка № 1 [Site No. 1]	Площадка № 2 [Site No. 2]	Площадка № 3 [Site No. 3]	Площадка № 4 [Site No. 4]	Площадка № 5 [Site No. 5]	Вес критерия [Criterion weight]	Вес группы критериев [Weight of the criterion group]
Критерий 1 [Criterion 1]	0,75	0,5	0,25	0,25	0,75	0,34	0,36
Критерий 2 [Criterion 2]	0,75	0,25	0,25	0,75	0,75	0,66	
Критерий 3 [Criterion 3]	0,15	0,17	0,29	0,22	0,17	0,37	0,4
Критерий 4 [Criterion 4]	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,37	
Критерий 5 [Criterion 5]	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,26	
Критерий 6 [Criterion 6]	0,75	0,25	0,5	0,5	0,25	0,2	0,24
Критерий 7 [Criterion 7]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,36	
Критерий 8 [Criterion 8]	0,75	0,25	0,25	0,25	0,25	0,44	
Весовой индекс [Weight index]	0,59	0,42	0,42	0,52	0,57		

Для каждого рассматриваемого варианта определены фактические значения критериев, которые приведены к сопоставимому виду (нормализованы). Весовые оценки, используемые для групп критериев и отдельных критериев внутри самих групп, были получены экспертным путем с привлечением специалистов АО «ГСПИ». Результаты оценки представлены в табл. 4.

Из пяти рассматриваемых площадок наибольший рейтинг получила площадка № 1, главным преимуществом которой является отсутствие необходимости землеотвода территории.

Предложенная методика соответствует поставленным задачам, так как позволяет осуществить рациональный и обоснованный выбор площадок для размещения ПЗРО с учетом его жизненного цикла.

Достоинством разработанной методики выбора площадок является универсальность, гибкость, наглядность, удобство в обработке результатов анализа.

Заключение

В настоящий момент выбор площадок для потенциально опасных объектов из-за многокритериальности их оценки может быть наглядно и информативно представлен с использованием ГИС-анализа данных с нанесением соответствующих ограничивающих и предпочтительных требований непосредственно на карту местности, как это показано выше на примере комплексов ПЗРО.

Учет необходимых требований, предъявляемых на различных этапах жизненного цикла, а также их значимость возможно в полной мере оценить методом взвешенных оценок и попарных сравнений с последующим их внесением в ГИС-анализ.

Предложенные дополнения к методике выбора площадки подходят для использования в решении задач размещения потенциально опасных объектов, объектов использования атомной энергии, что позволяет рациональным образом, с соблюдением всех необходимых нормативных требований, проводить выбор вариантов размещения потенциальных площадок с учетом жизненного цикла объекта.

В дальнейшем следует расширить количество учитываемых критериев, использовать по возможности имеющиеся статистические данные и технико-экономические сравнения вместо экспертных оценок.

Список литературы

1. Об утверждении прогнозируемого объема образования РАО для организаций ЯРОО: приказ Госкорпорации «Росатом» № 1/825-П от 10 сентября 2012 г. М.: ГК «Росатом», 2012. URL: <https://www.rosatom.ru/> (дата обращения: 29.04.2020 г.).
2. Фромзель В.Н., Шлейфер В.А. Проблема с РАО на АЭС России: ситуация может быть улучшена // Атомная стратегия. 2017. 13 декабря. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7786> (дата обращения: 29.04.2020 г.).
3. Кочкин Б.Т. Геоэкологический подход к выбору районов захоронения радиоактивных отходов. М.: Наука, 2005. 115 с.
4. Морозов В.Н., Шилиц И.Ю., Камнев Е.Н. Выбор площадок для захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях. М.: Горная книга, 2011. 216 с.
5. Цебаковская Н.С., Уткин С.С., Капырин И.В., Медянцева Н.В., Шамина А.В. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / под ред. И.И. Линге, Ю.Д. Полякова. М.: Комтехпринт, 2015. 208 с.
6. Metlay D.S. Selecting a Site for a Radioactive Waste Repository: A Historical Analysis // ELEMENTS. 2016. Vol. 12. Pp. 269–274. doi: 10.2113/gselements.12.4.269.
7. Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22 августа 2014 г. № 379. М., 2014.
8. НП-060-05. Размещение пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности: утв. пост. Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 августа 2005 г. № 3. М.: НТЦ ЯРБ, 2005.
9. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 83 с.
10. ГОСТ Р 52037-2003. Могильники приповерхностные для захоронения радиоактивных отходов. Общие требования. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 22 с.
11. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности. № SSR-5 // Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. Вена: МАГАТЭ, 2011. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1449r_Web.pdf (дата обращения: 29.04.2020 г.).
12. STI/PUB/1073. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования // Серия изданий по безопасности. № WS-R-1. Вена: МАГАТЭ, 2003. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1073r_web.pdf (дата обращения: 29.04.2020 г.).

13. Отчет по экологической безопасности ФГУП «ПО «Маяк»» за 2018 год / Госкорпорация «Росатом»; ФГУП «ПО «Маяк»». Озерск: РИЦ ВРБ; Типография ФГУП «ПО «Маяк»», 2019. 44 с.

14. НД п.4.2 СППНАЭ-93. Основные требования к разработке технико-экономического обоснования строительства атомной станции. Положение о порядке выбора площадки строительства. М.: Атомэнергопроект, 2000.

15. *Имашева З.З., Карамышева Э.Ф.* Технологии HR-менеджмента в стратегическом управлении компанией // *Науковедение*. 2015. Т. 7. № 5. С. 1–11. <http://dx.doi.org/10.15862/10EVN515>

16. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

Для цитирования

Панкратов Н.С., Белов В.В. Выбор площадок для строительства пунктов захоронения радиоактивных отходов // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 36–47. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-36-47>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-36-47

Research paper

Selection of sites for the construction of radioactive waste disposal points

Nikolai S. Pankratov

Moscow Regional Construction Central Research Laboratory, 20 Kulakova St, bldg. 1L, Moscow, 123592, Russian Federation
Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation

Vyacheslav V. Belov

Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation

Article history:

Received: May 7, 2020

Revised: May 13, 2020

Accepted: May 18, 2020

Keywords:

siting, radioactive waste, burial site radioactive waste, geoinformation analysis, ALARA principles, ranking of areas, waste management

The article deals with the selection of sites for the construction of nuclear installations, radioactive waste disposal sites and other facilities for the use of nuclear energy. The review of modern approaches to the selection of sites for placement of near-surface radioactive waste disposal points shows that the system research in this area is not fully presented, and is mainly aimed at solving problems of an engineering-geological nature for the location area, as well as the choice of materials for engineering protection barriers. In this paper, using the example of radioactive waste disposal sites, we review the requirements set by the regulatory documents of the Russian Federation and the International Atomic Energy Agency in the field of site selection. The authors proposed additions to the methodology for selecting sites for the construction of low-and medium-level waste disposal sites based on the system and GIS analysis of the ALARA principles, as well as the method of weighted evaluation of criteria and their pairwise comparisons. The multicriteria nature of the site selection problem is proposed to be described by GIS analysis of data with drawing the corresponding “limiting” and “preferred” requirements directly on the map of the area, which is shown in the article by the example of selecting sites for radioactive waste disposal points. Taking into account the necessary requirements at various stages of the life cycle, as well as their significance, can be assessed by weighted estimates and pairwise comparisons, followed by their introduction into the GIS analysis. This approach allows to choose rational options for placing potential sites, taking into account the life cycle of the object, in a rational way, with compliance with all necessary regulatory requirements.

References

1. *Ob utverzhdenii prognoziruемого ob"ema obrazovaniya RAO dlya organizacij YAROO [Approval of the pro-*

jected volume of radioactive waste generation for organizations of nuclear radiation-hazardous facilities]: order of the Rosatom State Corporation dated September 10, 2012, No. 1/825-R. Moscow: Rosatom State Corporation; 2012. Available from: <https://www.rosatom.ru/> (accessed: April 29, 2020). (In Russ.)

2. Fromzel VN, Shlejfer VA. Problema s RAO na AES Rossii: situaciya mozhet byt' uluchshena [The problem with radioactive waste from Russian nuclear power plants: the si-

Nikolai S. Pankratov, consultant of the testing laboratory of MosoblstroiTsnIL, master of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Stations of MGSU, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0075-6185>, pankratovnic@mail.ru
Vyacheslav V. Belov, senior lecturer of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Stations of MGSU, PhD in Technical Sciences, eLIBRARY SPIN-code: 6936-1160, BelovVV@mgsu.ru

tuation can be improved]. *Atomnaya strategiya [Atomic Strategy]*. 2017, December 13. Available from: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7786> (accessed: April 29, 2020). (In Russ.)

3. Kochkin BT. *Geoekologicheskij podhod k vyboru rajonov zahoroneniya radioaktivnyh othodov [Geocological approach to the choice of territories for disposal of radioactive waste]*. Moscow: Nauka Publ.; 2005. (In Russ.)

4. Morozov VN, Shishchic IYu, Kamnev EN. *Vybor ploshchadok dlya zahoroneniya radioaktivnyh othodov v geologicheskikh formacijah [Selection of sites for the disposal of radioactive waste in geological formations]*. Moscow: Gornaya kniga Publ.; 2011. (In Russ.)

5. Cebakovskaya NS, Utkin SS, Kapyrin IV, Medyancev NV, Shamina AV. *Obzor zarubezhnyh praktik zahoroneniya OYAT i RAO [Review of foreign practice of burial of OI RAO]*. Moscow: Komtekhpriint; 2015. (In Russ.)

6. Metlay DS. Selecting a site for a radioactive waste repository: a historical analysis. *ELEMENTS*. 2016;12: 269–274. doi: 10.2113/gselements.12.4.269.

7. *Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti ispol'zovaniya atomnoi energii "Zahoronenie radioaktivnykh otkhodov. Printsipy, kriterii i osnovnye trebovaniya bezopasnosti" [Federal norms and rules in the field of atomic energy use "Disposal of radioactive waste. Principles, criteria and basic safety requirements"]*: order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of August 22, 2014, No. 379. Moscow; 2014. (In Russ.)

8. NP-060-05. *Razmeshchenie punktov hraneniya yadernyh materialov i radioaktivnyh veshchestv. Osnovnye kriterii i trebovaniya po obespecheniyu bezopasnosti [Placement of storage points for nuclear materials and radioactive substances. Basic safety criteria and requirements]*: approved by resolution of Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of August 31, 2005, No. 3. Moscow: NTC YARB Publ.; 2005. (In Russ.)

9. SP 2.6.1.2612-10. *Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti (OSPORB-99/2010) [Basic sanitary rules of radiation safety (OSPORB-99/2010)]*. Moscow: Federal'nyj centr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora Publ.; 2010. (In Russ.)

10. GOST R 52037-2003. *Mogil'niki pripoverhnostnye dlya zahoroneniya radioaktivnyh othodov. Obshchie trebovaniya [Near-surface burial grounds for the disposal*

of radioactive waste. General requirements]. Moscow: IPK Izd-vo standartov Publ.; 2003. (In Russ.)

11. Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Konkretnye trebovaniya bezopasnosti. No. SSR-5 [Disposal of radioactive waste. Specific security requirements. No. SSR-5]. *Normy MAGATE po bezopasnosti dlya zashchity lyudej i ohrany okruzhayushchej sredy [IAEA safety standards for the protection of people and the environment]*. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2011. Available from: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1449r_Web.pdf (accessed: April 29, 2020). (In Russ.)

12. STI/PUB/1073. Pripoverhnostnoe zahoronenie radioaktivnyh othodov. Trebovaniya [Surface disposal of radioactive waste. Requirements]. *Seriya izdanij po bezopasnosti. No. WS-R-1 [Series of publications on safety. No. WS-R-1]*. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2003. Available from: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1073r_web.pdf (accessed: April 29, 2020). (In Russ.)

13. Rosatom State Corporation, Mayak Production Association. *Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti FGUP "PO 'Mayak' " za 2018 god [Report on environmental safety of Mayak Production Association for 2018]*. Ozersk: RIC VRB Publ.; Tipografiya "PO 'Mayak' ", 2019. (In Russ.)

14. ND p.4.2 SPPNAE-93. *Osnovnye trebovaniya k razrabotke tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya stroitel'stva atomnoj stancii. Polozhenie o poryadke vybora ploshchadki stroitel'stva [Basic requirements for the development of a feasibility study for the construction of a nuclear power plant. Regulations on the procedure for selecting a construction site]*. Moscow: Atomenergoproekt Publ.; 2000. (In Russ.)

15. Imasheva ZZ, Karamysheva EF. Tekhnologii HR-menedzhmenta v strategicheskom upravlenii kompaniej [HR-management technologies in strategic management of the company]. *Naukovedenie*. 2015;7(5):1–11. <http://dx.doi.org/10.15862/10EVN515> (In Russ.)

16. Saati T. *Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij [Decision-making. Method for analyzing hierarchies]*. Moscow: Radio i svya Publ.; 1993. (In Russ.)

For citation

Pankratov NS, Belov VV. Selection of sites for the construction of radioactive waste disposal points. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):36–47. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-36-47> (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-48-57

УДК 553.08

Научная статья

Определение последовательности образования медно-никелевых руд месторождения Кун-Манье (Амурская область)

А.Е. Котельников, Д.А. Колмакова, Е.М. Котельникова

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 10 апреля 2020 г.

Доработана: 23 апреля 2020 г.

Принята к публикации: 29 апреля 2020 г.

Ключевые слова:

Кун-Манье, Зейский район, медно-никелевое месторождение, микроскопия, минеральные ассоциации, парагенезисы

Целью статьи является определение последовательности минералообразования медно-никелевых руд месторождения Кун-Манье, расположенного в Зейском районе Амурской области. В строении месторождения принимают участие три залежи. Рудовмещающими образованиями являются пластовые и пластообразные тела ультраосновного состава кун-маньенского комплекса, залегающие среди пород кристаллического фундамента раннего архея. Среди пород преобладают роговообманковые разновидности габбро-пироксенитов и пироксенитов. Руды содержат, кроме никеля, широкий ряд попутных компонентов. Зона окисления руд в пределах месторождения и всего рудного поля не развита. Актуальность работы обусловлена тем, что детальными исследованиями рудных минералов ранее не проводилось. Настоящее исследование осуществлялось с использованием поляризационного рудного микроскопа по полированным рудным образцам, характеризующим разные зоны рудного тела. Результатом стало установление минеральных парагенезисов и последовательности образования минералов. Определено, что основными рудными минералами являются пирротин, пентландит, также встречаются – пирит, халькопирит, реже – ильменит, магнетит, сфалерит, элементы платиновой группы. Рудная минерализация сформировалась в два этапа. Магматический этап представляет собой раннюю и основную стадии минералообразования, включающие пирит-магнетитовую, полиметаллическую и пентландитовую ассоциации, а гидротермальный этап – позднюю стадию, включающую пиритовую ассоциацию.

Введение

Объектом исследования является месторождение Кун-Манье, расположенное на северо-востоке

Зейского района Амурской области. Ближайший населенный пункт – поселок Бомнак – находится в 240 км к юго-западу от объекта исследования. В 25 км к юго-западу от поселка Бомнак проходит линия Байкало-Амурской магистрали с пристанционными поселками Горный и Верхнезейск. Вкрапленные медно-никелевые сульфидные руды были выявлены в 1997 году. На всей перспективной площади и ее отдельных участках был выполнен обширный комплекс поисково-оценочных геолого-геофизических работ [1], а также проведены петромагнитные, палеомагнитные и геохимические исследования позднепалеопротерозойских никеленосных мафит-ультрамафитов Кун-Маньенского рудного поля [2; 3] и определен воз-

Котельников Александр Евгеньевич, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН, кандидат геолого-минералогических наук, Scopus Author ID: 57205586833, Web of Science ResearcherID: O-3821-2019, eLIBRARY SPIN-код: 6280-5070, AuthorID: 590048, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0622-8391>, kotelnikov-ae@rudn.ru

Колмакова Дарья Александровна, студентка департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН.

Котельникова Елена Михайловна, старший преподаватель департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН, кандидат геолого-минералогических наук, Scopus Author ID: 57205571168, Web of Science ResearcherID: L-7272-2018, eLIBRARY SPIN-код: 8173-9810, AuthorID: 728378, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8909-8953>

© Котельников А.Е., Колмакова Д.А., Котельникова Е.М., 2020

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



раст оруденения [4], при этом изучение минералогических, текстурно-структурных особенностей и последовательности образования не приводилось. Таким образом, исследование руд и рудных минералов месторождения является актуальным.

1. Цель, материалы и методы

Основная цель работы – определение последовательности образования руд месторождения Кун-Манье на основе изучения рудных минералов.

В качестве материалов исследования использовалась коллекция рудных образцов месторождения, поверхности которых были пришлифованы и отполированы для изучения в отраженном свете под поляризационным микроскопом. Представительность образцов определена тем, что они взяты с разных зон рудного тела. Для проведения минераграфического исследования использовался рудный поляризационный микроскоп ПОЛАМ Р-312. Методика определения и изучения рудных минералов под микроскопом описана в литературных источниках [5–8].

2. Геологическое строение месторождения

Под Кун-Маньенским рудным полем понимается площадь развития вкрапленных медно-никелевых руд, связанных пространственно и генетически с телами мафит-ультрамафитов одноименного интрузивного комплекса раннепротерозойского возраста и локализующихся в южном эндоконтакте Кун-Маньенского массива.

По простиранию рудное поле прослежено на 30 км, ширина варьирует от 2 до 3 км. В его состав входят 12 рудопроявлений и перспективных участков, три из них образуют месторождение Кун-Манье. Структурную основу рудного поля образуют никеленосные полого падающие на север и северо-восток пластины и линзовидно-пластовые интрузии мафит-ультрамафитов, залегающие, как правило, в несколько ярусов. Промышленное оруденение приурочено к некоторым из тел ультрамафитов, охватывая их полностью или частично как по мощности, так и по латерали. Наиболее часто рудоносными являются тела нижних ярусов. Нередко сульфидная минерализация распространяется и на экзоконтактовые зоны. В геологическом строении рудного поля принимают участие метаморфические стратифицируемые образования раннего архея, интрузивные комплексы архея, раннего протерозоя и мела [1; 9].

Рудоносность площади связана с кун-маньенским мафит-ультрамафитовым комплексом (vPR_1km), который на площади проявлен весьма широко. В пределах рудного поля выявлено около 30 крупных и десятки мелких интрузий мафит-ультрамафитов, расположенных группами, часто в несколько ярусов (по вертикали), реже отмечаются одиночные разрозненные тела. Породы этого рудоносного комплекса представлены вебстеритами, плагиовестеритами (габбро-пироксенитами), лерцолитами, клино- и ортопироксенитами, верлитами. Наиболее широко среди них распространены габбро-пироксениты и вебстериты. Остальные разновидности пород встречаются значительно реже. Изредка отмечаются гарцбургиты и горнблендиты [10].

В большинстве случаев тела, особенно наиболее значительные по мощности (до 70–80 м) и протяженности, имеют с вмещающими породами контакты, осложненные зонами трещиноватости, дробления и милонитизации.

Месторождение локализовано в центральной части Кун-Маньенского рудного поля, целесообразность разработки которого установлена в ходе геолого-экономической оценки объекта.

В строении месторождения принимают участие три неравные по размерам и запасам залежи, расположенные на площади около 3 км²: Соболевская на юго-востоке и сближенные Шляпа и Треугольник на северо-западе.

Рудовмещающими образованиями являются пластовые и пластообразные тела ультраосновного состава кун-маньенского комплекса, залегающие среди пород кристаллического фундамента раннего архея – метагаббро майско-джанинского комплекса, гнейсов джанинской серии.

Зона окисления руд в пределах месторождения и всего рудного поля не развита. Причина этого, вероятно, заключается в повсеместном развитии многолетней мерзлоты. По визуальным наблюдениям в канавах верхняя часть коренных пород почти не подвергнута процессам выветривания. Вторичные минералы сульфидов (лимонит, малахит и др.) встречаются редко и в незначительных количествах.

Суммарные минеральные ресурсы месторождения Кун-Манье по состоянию на 2017 год оцениваются в 101,3 млн тонн руды, 770 тыс. тонн никеля, 207 тыс. тонн меди, 15,2 тыс. тонн кобальта, 16,7 тонны платины и 18,1 тонны палладия [11; 12].

3. Минеральный состав руд и особенности руд месторождения

По минеральному и петрографическому составу породы Кун-Маньенского рудного поля подразделяются на четыре группы: 1) габброиды – габбро, габбро-нориты, габбро-пироксениты (плагиовестериты); 2) пироксениты – вебстериты, клино- и ортопироксениты; 3) перидотиты – лерцолиты, верлиты, гарцбургиты; 4) серпентиниты. Преобладают среди них роговообманковые разновидности габбро-пироксенитов и пироксенитов. Руды содержат, кроме никеля, широкий ряд попутных компонентов, набор которых типичен для месторождений данного типа: Cu, Co, Pd, Pt, Au, Ag, S. По содержанию никеля и попутных элементов руды месторождения отнесены к рядовым [1].

Наиболее распространенными на месторождении Кун-Манье является вкрапленные и пятнистые руды, получивших широкое распространение на всех его изученных залежах, в меньшей степени – прожилково-вкрапленная текстура. Брекчиевидные и массивные руды развиты ограниченно и отмечены на залежи Соболевской.

Сульфидная минерализация пространственно и генетически связана с мафит-ультрамафитами кун-маньенского комплекса (часто оталькованными, серпентинизированными и серицитизированными), распространяясь также в ближние экзоконтакты [2].

4. Микроскопическое описание аншлифов

Коллекция рудных образцов месторождения была проанализирована с использованием рудного поляризационного микроскопа. Ниже представлено описание нескольких образцов.

Образец № 33 состоит из таких минералов, как ильменит (i) – 40 об. %, пирит (py) – 30 об. %, магнетит (mt) – 25 об. %, пентландит (pl) – 5 об. %, халькопирит (cu) – единичные зерна.

Пирит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; встречается в виде гипидиоморфных и ксеноморфных агрегатов размерами до 400 мкм; отмечается неоднородное внутреннее строение (большинство зерен «изъедено» – диспергированная структура (рис. 1)); границы срастания с ильменитом и магнетитом довольно ровные.

Ильменит. Распределение по аншлифу неравномерное; представляет собой ксеноморфные и

гипидиоморфные агрегаты триклинной сингонии; наблюдается неоднородное внутреннее строение – графическая структура; границы срастания с другими минералами довольно ровные; размеры агрегатов доходят до 3 мм.

Магнетит (титаномагнетит). Распределение по площади аншлифа неравномерное; встречается в виде гипидиоморфных и диспергированных агрегатов; представлен в виде отдельных зерен различного размера до 100 мкм, иногда диспергированных и имеющих структуру перекристаллизации.

Пентландит. Распределение по площади аншлифа неравномерное, встречается редко, представлен мелкими включениями в ильмените с магнетитом с большей отражательной способностью (светлее).

Халькопирит. Представлен единичными зернами размером до 50 мкм.

Образец № 34 состоит из ильменита (i) – 60 об. %, магнетита (mt) – 20 об. %, пирита (py) – 16 об. %, халькопирита (cu) – 4 об. %.

Пирит. Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в основном в виде отдельных гипидиоморфных зерен; внутреннее строение неоднородное (отмечается наличие дефектов и мелких тонких трещин); размер зерен до 100 мкм.

Халькопирит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен мелкими (до 40 мкм) ксеноморфными и единичными изометрическими зернами; отмечается неоднородное внутреннее строение в виде трещин.

Ильменит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен в виде сероватобелых с очень слабым коричневатым оттенком гипидиоморфных и ксеноморфных зерен (тригональная сингония); имеет характерное двойникование в 1–2 направлениях (рис. 2, а); внутреннее строение неоднородное (отмечаются дефекты – зерна словно «изъедены»); размер зерен в среднем 100–500 мкм; границы срастания с магнетитом довольно ровные.

Магнетит. Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в виде ксеноморфных и гипидиоморфных агрегатов; внутреннее строение агрегатов близко к однородному; встречается в виде мелких диспергированных агрегатов, как бы окаймляющих минералы вмещающих пород (рис. 2, б).

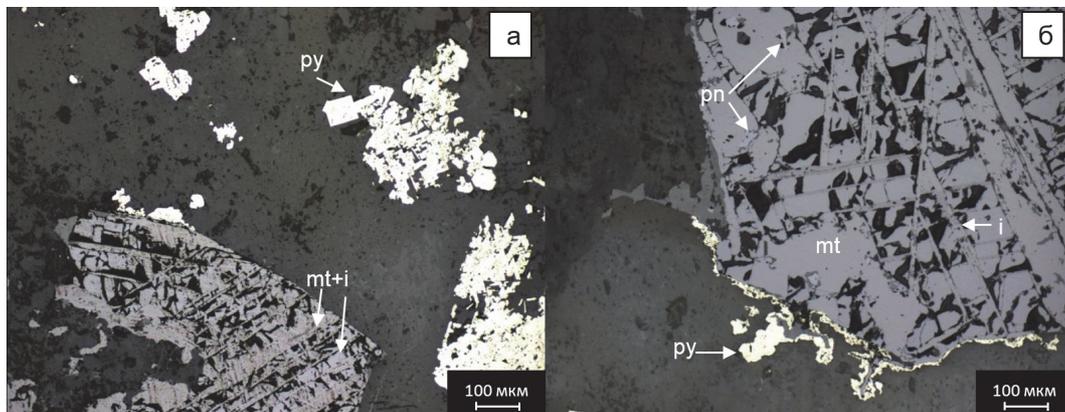


Рис. 1. Микрофотография рудного образца № 33. Вкрапленная текстура:
 а – сетка ильменита из распавшегося твердого раствора титаномагнетита, в котором выщелочен магнетит (серый) и пирит (белый с желтым оттенком);
 б – графическая структура ильменита с включениями пентландита
[Figure 1. Micrograph of ore sample No. 33. Interspersed texture:
 а – a grid of ilmenite from a decayed solid solution of titanomagnetite, in which magnetite (gray) and pyrite (white with a yellow tint) are leached;
 б – graphic structure of ilmenite with inclusions of pentlandite]

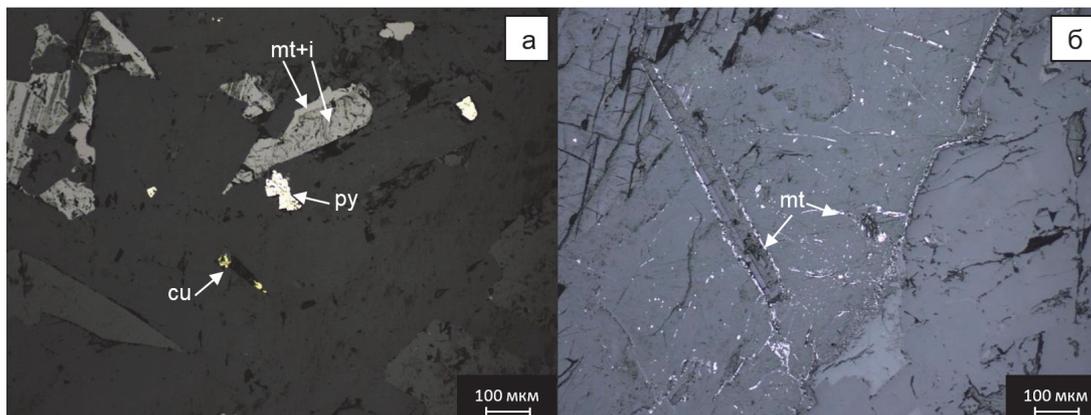


Рис. 2. Микрофотография рудного образца № 34:
 а – структура замещения ильменит (i) и магнетита (mt); б – магнетит (титаномагнетит) в виде каемок во вмещающей породе
[Figure 2. Micrograph of ore sample No. 34:
 а – substitution structure of ilmenite (i) and magnetite (mt); б – magnetite (titanomagnetite) in the form of rims in the host rock]

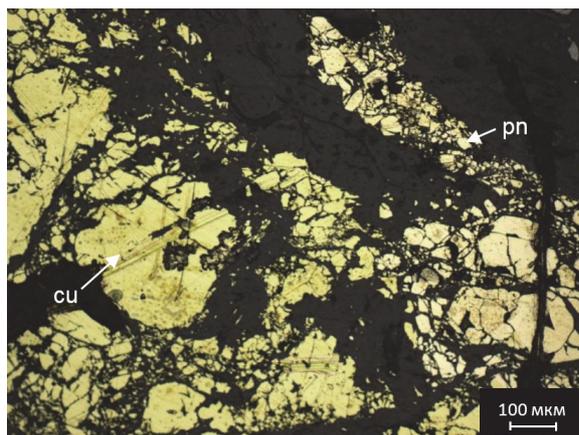


Рис. 3. Микрофотография рудного образца № 35.
 Катакlastическая структура халькопирита и пирротина
[Figure 3. Micrograph of ore sample No. 35.
 Cataclastic structure of chalcopyrite and pyrrhotine]

Образец № 35 состоит из халькопирита (cu) – 50 об. %, пирротина (pn) – 20 об. %, сфалерита (sf) – 20 об. %, пирита (py) – 10 об. %.

Пирит. Распределение неравномерное по площади аншлифа; представлен гипидиоморфными и ксеноморфными зернами с неоднородным внутренним строением; размеры зерен до 100 мкм.

Халькопирит. Распределение по площади аншлифа неравномерное, ближе к пятнистому (агрегат размером 0,7 мм); представлен ксеноморфными агрегатами с катакlastической структурой (рис. 3); имеет достаточно ровные границы сращения с пирротинном и сфалеритом.

Пирротин. Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в виде ксеноморфных зерен с катакlastической структурой, переходящей

в диспергированную, развивается одновременно с халькопиритом; границы срастания с халькопиритом довольно ровные.

Сфалерит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен чаще ксеноморф-

ными агрегатами, достигающими 0,2 мм; внутреннее строение неоднородное (имеются дефекты в виде трещин, образующие катакластическую структуру); границы срастания с халькопиритом – ровные.

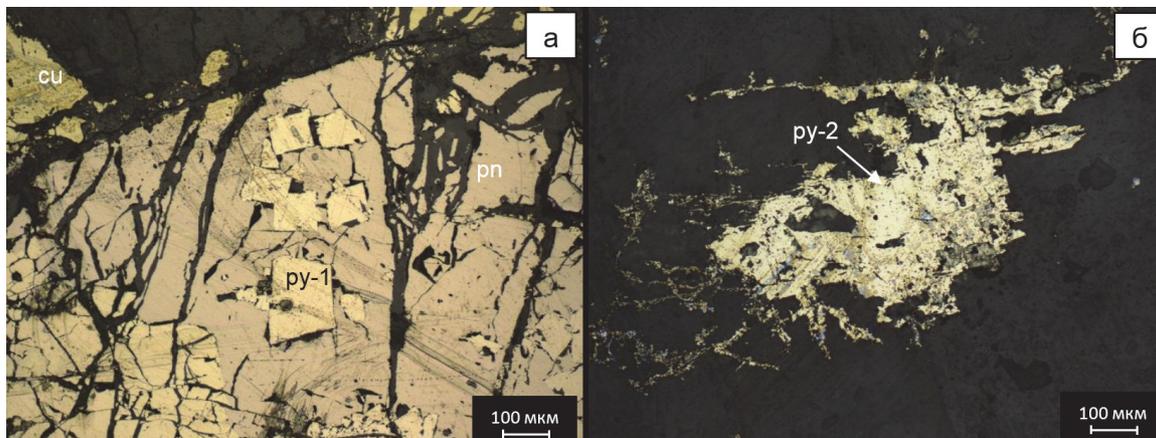


Рис. 4. Микрофотография рудного образца № 36:
 а – катакластическая структура и структура замещения – халькопирит и пирротин замещают пирит;
 б – структура перекристаллизации – ксеноморфный диспергированный пирит
[Figure 4. Micrograph of ore sample No. 36:
 а – cataclastic structure and substitution structure – chalcopyrite and pyrrhotine replace pyrite;
 б – recrystallization structure – xenomorphic dispersed pyrite]

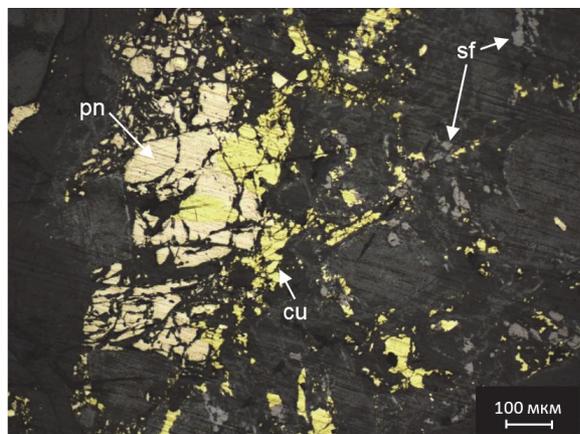


Рис. 5. Микрофотография рудного образца № 37.
 Катакластическая структура пирротина с халькопиритом
[Figure 5. Micrograph of ore sample No. 37.
 Cataclastic structure of pyrrhotine with chalcopyrite]

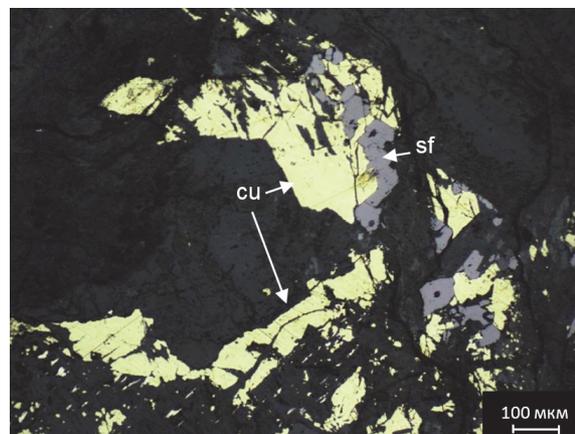


Рис. 6. Микрофотография рудного образца № 38.
 Сфалерит образует агрегаты неправильной формы размером до 70 мкм в ксеноморфных зернах халькопирита
[Figure 6. Micrograph of ore sample No. 38.
 Sphalerite forms irregularly shaped aggregates up to 70 microns in xenomorphic chalcopyrite grains]

Образец № 36 состоит из халькопирита (cu) – 45 об. %, пирротина (pn) – 20 об. %, сфалерита (sf) – 20 об. %, пирита (py) – 15 об. %.

Пирит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен гипидиоморфными и ксеноморфными зернами с неоднородным внутренним строением; отмечаются генерации: py-1

(представлен катакластическими и гипидиоморфными кубическими кристаллами – рис. 4, а) и py-2 (неравномерное распределение, представлен диспергированными ксеноморфными агрегатами – перекристаллизация – рис. 4, б).

Халькопирит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен ксеноморф-

ными и катакластической агрегатами; имеет достаточно ровные границы срастания с пирротином и сфалеритом.

Пирротин. Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в виде ксеноморфных и катакластических зерен, развивается одновременно с халькопиритом – структура замещения пирита; границы срастания с халькопиритом довольно ровные.

Сфалерит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен чаще ксеноморфными агрегатами; внутреннее строение неоднородное (дефекты в виде трещин); границы срастания с халькопиритом – ровные.

Образец № 37 состоит из пирротина (pn) – 30 об. %, халькопирита (cu) – 30 об. %, сфалерита (sf) – 25 об. %, пирита (py) – 15 об. %.

Пирит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен гипидиоморфными и ксеноморфными зернами с неоднородным внутренним зональным строением – диспергированные, перекристаллизация.

Халькопирит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен ксеноморфными и мелкими изометрическими зернами (перекристаллизация); имеет довольно ровные границы срастания с пирротином (рис. 5).

Пирротин. Распределение по аншлифу неравномерное; встречается в виде ксеноморфных зерен, развивается вместе с халькопиритом; границы срастания с халькопиритом довольно ровные.

Сфалерит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен зернами неправильной формы; внутреннее строение неоднородное (дефекты в виде трещин); границы срастания с халькопиритом – ровные.

Образец № 38 состоит из халькопирита (cu) – 40 об. %, сфалерита (sf) – 35 об. %, пирита (py) – 30 об. %, пирротина (pn) – единичные зерна.

Пирит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен гипидиоморфными и ксеноморфными зернами с неоднородным внутренним зональным строением – «изъеденные», перекристаллизация.

Халькопирит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен ксеноморфными и мелкими изометрическими зернами (перекристаллизация); имеет ровные границы срастания со сфалеритом (рис. 6).

Сфалерит. Распределение по площади аншлифа неравномерное; представлен зернами непра-

вильной формы; внутреннее строение неоднородное (имеются дефекты в виде трещин); границы срастания с халькопиритом – ровные.

Пирротин. Встречается в виде мелких единичных зерен с халькопиритом.

5. Минеральные парагенезисы, последовательность образования минералов

Схема последовательности формирования руд месторождения основана на результатах изучения текстурных и структурных особенностей руд, а также возрастных соотношений минеральных агрегатов. В истории формирования руд месторождения выделено три стадии: ранняя рудная (I), рудная (II), поздняя рудная (III) (см. таблицу).

Пирит-магнетитовая ассоциация представлена преимущественно гипидиоморфными зернами пирита-1 и ксеноморфными агрегатами магнетита, имеющими размеры до 200–500 мкм.

Пирит-1 – распределение неравномерное и часто встречается в образцах; представлен в виде гипидиоморфных и ксеноморфных зерен, реже – в виде мелких почти изометрических зерен во вмещающей породе; имеет диспергированную структуру, иногда – зональное строение; размеры до 500 мкм.

Магнетит – распределяется в аншлифах неравномерно; представлен ксеноморфными агрегатами размером до 200 мкм, иногда диспергированных, образующих структуру перекристаллизации; имеет ровные границы срастания с ильменитом.

Полиметаллическая ассоциация (сфалерит-пирротин-халькопирит-пирит-магнетит-ильменитовая), в которой сфалерит с халькопиритом и пирротином представлены ксеноморфными агрегатами, заполняющими пространство между зернами пирита, нередко образуя катакластическую структуру. Также в это время минералообразования формировались агрегаты ильменита путем выщелачивания раствора магнетита из титаномагнетита.

Халькопирит – в аншлифах распределен неравномерно; находится в виде ксеноморфных и катакластических агрегатов, а также в виде мелких зерен во вмещающей породе (до 10 мкм).

Сфалерит – неравномерное распределение в аншлифах; представлен ксеноморфными зернами до 0,2 мм.

Пирротин – распределен в аншлифах неравномерно; встречается в виде ксеноморфных и ка-

такластических агрегатов, развивается совместно с халькопиритом, размеры до 3 см.

Ильменит – неравномерное распределение в аншлифах; отмечается графическая структура (представлена в виде сетки ильменита, образовавшегося, скорее всего, из титаномагнетита, из которого был выщелочен магнетит).

Халькопирит-ильменитовая (сфалерит-пирротин-халькопирит-ильменитовая) ассоциация представляет собой неравномерно распределенные, доминирующие в объемном количестве зерна халькопирита и ильменита, а также зерна сфалерита и пирротина (описание минералов приведено выше).

Таблица

Схема последовательности минералообразования в рудах месторождения Кун-Манье
[Table. The sequence of mineral formation in the ores of the Kun-Manye deposit]

СТАДИИ [STAGES]	Ранняя [Early]	Основная [Basic]			Поздняя [Late]
Минеральные ассоциации [Mineral associations]	пирит-магнетитовая [pyrite-magnetite]	полиметаллическая [polymetallic]	халькопирит-ильменитовая [chalcopyrite-ilmenite]	пентландитовая [pentlandite]	пиритовая [pyrite]
Оливин [Olivine]	██████████				
Пироксен [Pyroxene]	██████████				
Плагиоклаз [Plagioclase]	██████████				
Пирит [Pyrite]		██████████			██████████
Магнетит [Magnetite]		██████████			
Сфалерит [Sphalerite]			██████████		
Халькопирит [Chalcopyrite]			██████████		
Пирротин [Pyrrhotine]			██████████		
Ильменит [Ilmenite]			██████████		
Карбонат [Carbonate]					██████████
Пентландит [Pentlandite]				██████████	
Блеклая руда [Fahlore]				██████████	

Примечание: — — — — — тектонические перерывы; ██████████ – главные минералы; ██████████ – второстепенные минералы; ██████████ – редкие минералы.

Note: — — — — — tectonic fissures; ██████████ – major minerals; ██████████ – minor mineral; ██████████ – rare mineral.

Пентландитовая ассоциация. Пентландит представлен мелкими, почти изометрическими включениями в ильмените с магнетитом; в аншлифах распределяется неравномерно; встречается редко, размеры до 10 мкм.

В гидротермальном этапе (*пиритовая ассоциация*), образовался пирит второй генерации – распределение неравномерное в аншлифах; встречается редко в виде идиоморфных и катакластических кристаллов, замещающихся халькопиритом и пирротинном; размеры кристаллов достигают 400 мкм.

Изучение образцов показало, что рудная минерализация сформировалась в два этапа:

1) магматического (ранняя и основная стадии минералообразования), в пределах которого выделено три ассоциации минералов: пирит-магнетитовая, полиметаллическая (сфалерит-пирротин-халькопирит-пирит-магнетит-ильменитовая), пентландитовая;

2) гидротермального (поздняя стадия), в котором выделена пиритовая ассоциация.

Полученные результаты коррелируют с результатами других исследователей по схожим медно-никелевым объектам [13–19].

Заключение

На месторождении по структурно-текстурным особенностям можно выделить несколько типов сульфидных руд: наиболее распространенные – вкрапленные и пятнистые, в меньшей степени – прожилково-вкрапленная, редко – брекчиевидные и массивные.

В результате проведенного исследования рудных образцов медно-никелевого месторождения Кун-Манье была установлена последовательность минералообразования и выявлены парагенетические ассоциации и порядок их образования. Формирование рудной минерализации происходило в два этапа: магматический и гидротермальный. Определено, что основными среди рудных минералов являются пирротин, пентландит, также встречаются – пирит, халькопирит, реже – ильменит, магнетит, сфалерит, элементы платиновой группы.

Список литературы

1. Карлюсов Е.Д. Технично-экономическое обоснование временных разведочных кондиций на вкрапленные медно-никелевые руды объекта Кун-Манье: протокол ГКЗ Роснедра № 236-к от 23 апреля 2008 г. Красноярск: ОАО «СибцветметНИИпроект», 2007.

2. Гурьянов В.А., Приходько В.С., Петухова Л.Л., Песков А.Ю. Минералого-геохимические особенности даек коматиитов Кун-Маньенского рудного поля: источники, условия и обстановка формирования (юго-восточное обрамление Сибирской платформы) // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: материалы V Международной конференции (Гремячинск, 2–6 сентября 2017 г.). Улан-Удэ: Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, 2017. С. 105–107.

3. Песков А.Ю., Диденко А.Н., Гурьянов В.А. Эволюция палеопротерозойского мафит-ультрамафитового магматизма Кун-Маньенского рудного поля (Алдано-Становой щит) по палеомагнитным данным // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 5. С. 3–15.

4. Степанов В.А. Платиноидно-медно-никелевые провинции Северо-Азиатского кратона // Региональная геология и металлогения. 2013. № 56. С. 78–87.

5. Исаенко М.П., Боршианская С.С., Афанасьева Е.Л. Определитель главнейших минералов руд в отраженном свете. М.: Недра, 1986.

6. Попов В.А. Морфологическая информативность минералов // Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы конференции. Екатеринбург – Миасс, 2010. С. 54–55.

7. Коваль И.К., Коробкина Т.П. Основы минералогии. Воронеж: ВГУ, 2011.

8. Bernhard P. The Ore Minerals under the Microscope: An Optical Guide. 2nd ed. Elsevier, 2016. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01360-9>

9. Гурьянов В.А., Петухова Л.Л., Приходько В.С., Матвеев А.В., Вельма А.М., Алексеев М.И., Кремнецкий М.И. Оценка перспектив никеленосности юго-восточного обрамления Сибирской платформы // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: Четвертая Всероссийская научная конференция с международным участием (Благовещенск, 5–7 октября 2016 г.). Благовещенск: Буквица, 2016. С. 48–51.

10. Копылов М.И., Тихомирова А.И. Особенность вещественного состава и специализация габброанортозитовых массивов Дальневосточного пояса на титановые и медно-никелевые руды // XVI Ферсмановская научная сессия ГИ КНЦ РАН: сборник трудов (Апатиты, 7–10 апреля 2019 г.). Апатиты, 2019. № 16. С. 288–293. <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.058>

11. Кун-Манье // NEDRADV (Недра ДВ). URL: <https://nedradv.ru/nedradv/invetsp/?obj=c5bfec301d9737167c9489604b0d1ff7#about> (дата обращения: 15.02.2020 г.).

12. Project Background / Amur Minerals Corporation (AMC). URL: <https://amurminerals.com/project-details> (дата обращения: 15.02.2020 г.).

13. Гурьянов В.А., Приходько В.С., Пересторонин А.Н., Потоцкий Ю.П., Петухова Л.Л., Соболев Л.П. Новый тип медно-никелевых месторождений юго-востока Алдано-Станового щита // Доклады академии наук. 2009. Т. 425. № 4. С. 505–508.

14. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006.

15. Налдретт А.Дж. Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометалльных руд. СПб.: СПбГУ, 2003.

16. Маракушев А.А., Паняк Н.А., Зотов И.А. Проблемы формирования медно-никелевых сульфидных месторождений // Руды и металлы. 2002. № 2. С. 23–33.

17. Barnes S.J., Mungall J.E., Le Vaillant M., Godel B., Leshner C.M., Howell D., Lightfoot P.C., Krivolutsкая N., Wei B. Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: disseminated and net-textured ores // American Mineralogist. 2017. Vol. 102. No. 3. Pp. 473–506. doi: <https://doi.org/10.2138/am-2017-5754>

18. Schulz K.J., Woodruff L.G., Nicholson S.W., Seal R.R. II, Piatak N.M., Chandler V.W., Mars J.L. Occurrence model for magmatic sulfide-rich nickel-copper (platinum-group element) deposits related to mafic and ultramafic dike-sill complexes: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–I. 2014. 80 p. <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070I>

19. Liu Y.G., Li W.Y., Lü X.B., Huo Y.H., Zhang B. The Pobei Cu-Ni and Fe ore deposits in NW China are comagmatic evolution products: evidence from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and geochemistry // Geologica Acta. 2017. Vol. 15. No. 1. Pp. 37–50. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2017.15.1.4>

Для цитирования

Котельников А.Е., Колмакова Д.А., Котельникова Е.М. Определение последовательности образования медно-никелевых руд месторождения Кун-Манье (Амурская

область) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 48–57. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-48-57>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-48-57

Research paper

Determination of the copper-nickel ores formation sequence of the Kun-Manye deposit (Amur region)

Alexander E. Kotelnikov, Daria A. Kolmakova, Elena M. Kotelnikova

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

Article history:

Received: April 10, 2020

Revised: April 23, 2020

Accepted: April 29, 2020

Keywords:

Kun-Manie, Zeya district, copper-nickel deposit, microscopy, mineral associations, paragenesis

The purpose of the article is to determine the sequence of mineral formation of copper-nickel ores of Kun-Manie deposit, which is located in Zeya district of Amur region. Three ore chutes take part in the structure of the deposit. Ore-bearing formations are sheet and sheetlike bodies of ultrabasic composition of the Kun-Manien complex, lying among rocks of crystal foundation of the Early Archean. Among the rocks, hornblende differences of gabbro-pyroxenites and pyroxenites predominate. In addition to nickel, the ores contain a wide range of associated components. The ores oxidation zone within the deposit and the entire ore field is not developed. The relevance of the work is due to the fact that detailed studies of ore minerals have not previously been carried out. The study presented in the work was conducted by polarizing ore microscope on polished ore samples characterizing different zones of the ore body. The result of the study was the establishment of mineral paragenesis and the sequence of mineral formation. It has been determined that the main ore minerals are pyrrhotite, pentlandite, also found – pyrite, chalcopyrite, less often – ilmenite, magnetite, sphalerite, platinum group elements. Ore mineralization formed in two stages. The magmatic stage is an early and main mineral formation phases including pyrite-magnetite, polymetallic and pentlandite associations. The hydrothermal stage is a late phase involving a pyrite association.

References

1. Karalyusov ED. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vremennykh razvedochnykh konditsii na vkraplennyye medno-nikelevyye rudy ob'ekta Kun-Man'e* [Feasibility study of temporary exploration conditions for disseminated copper-nickel ores at the Kun-Manye site]: Protocol GKZ Rosnedra No. 236-k dated April 23, 2008. Krasnoyarsk: OJSC "SibsvetmetNIIproekt"; 2007. (In Russ.)
2. Guryanov VA, Prikhodko VS, Petukhova LL, Peskov AY. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti daek

komatiitov Kun-Man'enskogo rudnogo polya: istochniki, usloviya i obstanovka formirovaniya (yugo-vostochnoe obramlenie Sibirskoi platformy) [Mineralogical and geochemical features of the Kun-Manye ore field katiitit dikes: sources, conditions and formation conditions (southeastern border of the Siberian platform)]. *Ul'tramafit-mafitovyye kompleksy: geologiya, stroenie, rudnyi potential* [Ultramafic-mafic complexes: geology, structure, ore potential]: *proceedings of Fifth International Conference (Gremyachinsk, September 2–6, 2017)*. Ulan-Ude: Dorji Banzarov Buryat State University; 2017. p. 105–107. (In Russ.)

3. Peskov AY, Didenko AN, Guryanov VA. Paleoproterozoic Evolution of Mafic-Ultramafic Magmatism of the Kun-Manie Ore Field (Aldan-Stanovoy Shield): Evidence from Paleomagnetic Data. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2018;12(5):341–353. (In Russ.)

4. Stepanov VA. Platinoidno-medno-nikelevyye provintsi Severo-Aziatskogo kratona [Platinum-copper-nickel provinces of the North-Asian craton]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional geology and metallogeny]. 2013;56:78–87. (In Russ.)

Alexander E. Kotelnikov, Associate Professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering of Engineering Academy of RUDN University, PhD in Geology, Scopus Author ID: 57205586833, Web of Science ResearcherID: O-3821-2019, eLIBRARY SPIN-код: 6280-5070, AuthorID: 590048, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0622-8391>, kotelnikov-ae@rudn.ru

Daria A. Kolmakova, student of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

Elena M. Kotelnikova, senior lecturer of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering of Engineering Academy of RUDN University, PhD in Geology, Scopus Author ID: 57205571168, Web of Science ResearcherID: L-7272-2018, eLIBRARY SPIN-код: 8173-9810, AuthorID: 728378, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8909-8953>

5. Isaenko MP, Borishanskaya SS, Afanasyeva EL. *Opredelitel' glavnishikh mineralov rud v otrazhennom svete [Key to the most important minerals of ores in reflected light]*. Moscow: Nedra Publ.; 1986. (In Russ.)
6. Popov VA. Morfologicheskaya informativnost' mineralov [Morphological information content of minerals]. *Mineraly: stroenie, svoystva, metody issledovaniya [Minerals: structure, properties, research methods]*: conference proceedings. Ekaterinburg, Miass; 2010. p. 54–55. (In Russ.)
7. Koval IK, Korobkina TP. *Osnovy minerografii [The basics of mineragraphy]*. Voronezh: Voronezh State University; 2011. (In Russ.)
8. Bernhard P. *The Ore Minerals Under the Microscope: An Optical Guide*. 2nd ed. Elsevier; 2016. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01360-9>
9. Guryanov VA, Petukhova LL, Prikhodko VS, Matveev AV, Velma AM, Alekseev MI, Kremenetsky MI. Otsenka perspektiv nikelenosnosti yugovostochnogo obramleniya Sibirskoi platform [Assessment of the prospects for nickel content of the southeastern frame of the Siberian platform]. *Voprosy geologii i kompleksnogo osvoeniya prirodnikh resursov Vostochnoi Azii [Questions of geology and integrated development of natural resources of East Asia]: proceedings of Fourth All-Russian Scientific Conference with International Participation (Blagoveshchensk, October 5–7, 2016)*. Blagoveshchensk: Bukvitsa Publ.; 2016. p. 48–51. (In Russ.)
10. Kopylov MI, Tikhomirova AI. Osobennost' veshchestvennogo sostava i spetsializatsiya gabbroanortozitovykh massivov Dal'nevostochnogo poyasa na titanovye i medno-nikelevye rudy [Mineralogical composition and specialization of the gabbro-anorthosite massifs of the Far Eastern belt for titanium and copper-nickel ores]. *XVI Fersmanovskaya nauchnaya sessiya GI KNTs RAN [16th Fersmanov Scientific Session of the Geological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]: session proceedings (Apatity, April 7–10, 2019)*. Apatity; 2019. No. 16. p. 288–293. <https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.058> (In Russ.)
11. Kun-Manye. *NEDRADV*. Available from: <https://nedradv.ru/nedradv/investsp/?obj=c5bfec301d9737167c9489604b0d1ff7#about> (accessed: February 15, 2020). (In Russ.)
12. Amur Minerals Corporation (AMC). *Project Background*. Available from: <https://amurminerals.com/project-details> (accessed: February 15, 2020).
13. Guryanov VA, Prikhodko VS, Perestoronin AN, Pototsky YuP, Petukhova LL, Sobolev LP. Novyi tip medno-nikelevykh mestorozhdenii yugo-vostoka Aldano-Stanovogo shchita [A new type of copper-nickel deposits in the south-east of the Aldan-Stanovoi shield]. *Doklady akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*. 2009;425(4):505–508. (In Russ.)
14. Likhachev AP. *Platino-medno-nikelevye i platinovye mestorozhdeniya [Platinum-copper-nickel and platinum deposits]*. Moscow: Eslan Publ.; 2006. (In Russ.)
15. Naldrett AJ. *Magmaticheskie sulfidnye mestorozhdeniya medno-nikelevykh i platinometall'nykh rud [Magmatic sulfide deposits of copper-nickel and platinum metal ores]*. Saint Petersburg: SPbSU Publ.; 2003. (In Russ.)
16. Marakushev AA, Paneyakh NA, Zotov IA. Problemy formirovaniya medno-nikelevykh sulfidnykh mestorozhdenii [Problems of the formation of copper-nickel sulfide deposits]. *Rudy i metally [Ores and metals]*. 2002; 2:23–33. (In Russ.)
17. Barnes SJ, Mungall JE, Le Vaillant M, Godel B, Leshner CM, Holwell D, Lightfoot PC, Krivolutsкая N, Wei B. Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: disseminated and net-textured ores. *American Mineralogist*. 2017;102(3):473–506. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5754>
18. Schulz KJ, Woodruff LG, Nicholson SW, Seal RR, II, Piatak NM, Chandler VW, Mars JL. *Occurrence model for magmatic sulfide-rich nickel-copper-(platinum-group element) deposits related to mafic and ultramafic dike-sill complexes: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–I*. 2014. <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070I>
19. Liu YG, Li WY, Lü XB, Huo YH, Zhang B. The Pobei Cu-Ni and Fe ore deposits in NW China are comagmatic evolution products: evidence from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and geochemistry. *Geologica Acta*. 2017;15(1):37–50. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2017.15.1.4>

For citation

Kotelnikov AE, Kolmakova DA, Kotelnikova EM. Determination of the copper-nickel ores formation sequence of the Kun-Manye deposit (Amur region). *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):48–57. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-48-57> (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-58-65

УДК 528.063

Научная статья

Развитие методов уравнивания нивелирных сетей

Е.Н. Есина

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,
Российская Федерация, 111020, Москва, Крюковский тупик, 4
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

В.В. Лиходеевская

ООО «СМУ-6 Метростроя», Российская Федерация, 127473, Москва, ул. Селезневская, д. 29, стр. 2

История статьи:

Поступила в редакцию: 11 апреля 2020 г.

Доработана: 16 мая 2020 г.

Принята к публикации: 18 мая 2020 г.

Ключевые слова:

геомеханический мониторинг, нивелирные сети, уравнивание, параметрический метод уравнивания, метод узлов профессора В.В. Попова

Статья посвящена сравнению методик расчета приближенных отметок узловых пунктов при уравнивании нивелирных сетей строгими и нестрогими методами. В ходе интенсивного освоения подземного пространства мегаполисов, строительства уникальных объектов и сооружений актуальным является обеспечение геомеханического мониторинга за взаимным влиянием возводимых и эксплуатируемых объектов. При выполнении работ по мониторингу деформационных процессов возникает задача оценки устойчивости опорных реперов в случае их попадания в зону влияния других объектов. В ходе исследования были разработаны математические модели нивелирных сетей, представленных в виде замкнутого хода и набора разомкнутых полигонов. Анализ моделирования позволяет определить возможность применения метода узлов профессора В.В. Попова вместо параметрического метода уравнивания. Установлено, что качество результатов уравнивания строгим методом полностью зависит от качества измерений, поскольку отклонения от истинных значений не превышают ошибку измерения. Выполненные исследования показали, что можно добиться упрощения обработки данных мониторинга и оценки различных вариантов конфигурации нивелирных сетей, используя алгоритмы расчета приближенных отметок узловых пунктов. Это позволяет упростить обработку результатов мониторинга и оценку различных вариантов конфигурации сетей при обеспечении требуемого уровня точности измерений.

Введение

В современных условиях больших мегаполисов при активной застройке целых микрорайонов,

активном освоении подземного пространства этих территорий, строительстве уникальных объектов и сооружений остро встает вопрос геомеханического мониторинга за взаимным влиянием возводимых и эксплуатируемых объектов [1–5]. В центре мегаполисов подземное пространство используется максимально активно. Этому способствуют дефицит земли, жесткие ограничения по высоте здания, габаритам участка, архитектурному стилю. В то же время подземные объекты являются объектами повышенной опасности как в процессе строительства, так и при эксплуатации. Осо-

Есина Екатерина Николаевна, старший научный сотрудник ИПКОН РАН, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН, доцент, кандидат технических наук, Web of Science ResearcherID: E-6092-2017, eLIBRARY SPIN-код: 9090-9868, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1685-2406>, esina-en@rudn.ru
Лиходеевская Владислава Васильевна, сменный маркшейдер ООО «СМУ-6 Метростроя».

© Есина Е.Н., Лиходеевская В.В., 2020

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



бенно в условиях плотной жилой застройки города и его подземной части. Эффективность и безопасность освоения подземного пространства крупных городов определяется достоверностью оценки исходного геомеханического состояния массива горных пород, качеством выполненного прогноза его изменения в результате техногенного воздействия и подземного строительства, а также оперативностью и соответствием требованиям мониторинга за развитием деформационных процессов [5]. Контроль за геомеханическими процессами, происходящими в массиве горных пород, на земной поверхности и в сооружениях, является наиболее ответственным этапом работ. Под геомеханическим мониторингом понимается «система инструментальных наблюдений, обеспечивающая своевременное обнаружение признаков, предшествующих возникновению аварийных ситуаций с таким расчетом, чтобы вовремя можно было принять необходимые профилактические и защитные мероприятия» [6–8]. При выполнении работ по мониторингу деформационных процессов возникает задача оценки влияния устойчивости опорных реперов, потому что в описанной выше ситуации может наблюдаться явление попадания опорного репера в зону влияния другого объекта, как строящегося, так и эксплуатируемого [9–11]. Большинство методик по оценке устойчивости опорных реперов базируются на использовании результатов уравнивания и оценки точности по результатам уравнивания. В современных условиях существует две группы методов уравнивательных вычислений: строгие, полностью реализующие главное условие метода наи-

меньших квадратов, и нестрогие, в которых это условие либо выполняется частично, либо вообще не выполняется [12–15]. Из строгих в настоящее время самое большое распространение получил параметрический метод уравнивания. Из нестрогих наиболее всего под решения задач анализа деформационной составляющей геомеханического мониторинга подходит метод узлов профессора В.В. Попова [16–19]. Актуальной является задача обоснования условий применения строгих и нестрогих методов уравнивания на основе оценки точности получаемых результатов.

Результаты и обсуждение

Исследование выполнено в несколько этапов. Были рассмотрены стандартные схемы нивелирных сетей, применяемых при геомониторинге. На первом этапе рассматривались сети, представленные группой замкнутых нивелирных ходов с узловыми точками, встречающиеся преимущественно при строительстве зданий и сооружений. На втором этапе выполнялись исследования по разомкнутым полигонам, применяемым в качестве профильных линий на месторождениях полезных ископаемых.

Схемы исходных сетей представлены на рис. 1, 2. Для создания математических моделей были сгенерированы отметки всех узловых и исходных реперов и длины звеньев сети. По заданным отметкам рассчитывались превышения по каждому звену сети, то есть разработаны идеальные модели по каждому полигону (без ошибок) (см. таблицу).

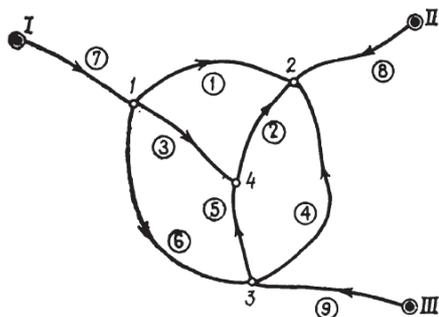


Рис. 1. Схема замкнутого нивелирного хода
[Figure 1. Scheme of a closed leveling stroke]

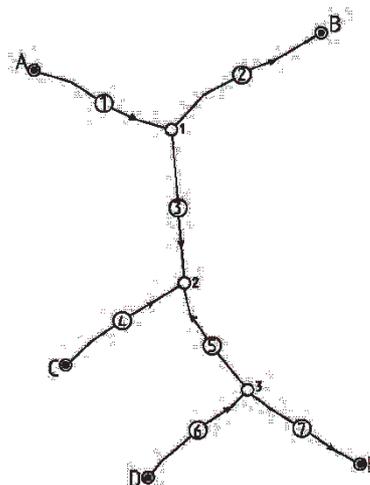


Рис. 2. Схема разомкнутого полигона
[Figure 2. Diagram of an open polygon]

Исходные данные для создания модели
 [Table. Source data for creating the model]

Замкнутый нивелирный ход [Closed leveling stroke]			Разомкнутые полигоны [Open polygons]		
Номер хода [Number of stroke]	Длина, км [Length, km]	Превышение, м [Exceeding, m]	Номер хода [Number of stroke]	Длина, км [Length, km]	Превышение, м [Exceeding, m]
1	17,2	11,149	1	9,7	3,238
2	6,4	4,207	2	8,0	1,753
3	12,1	6,977	3	20,2	0,844
4	3,8	5,101	4	13,6	7,753
5	7,7	0,930	5	10,6	2,247
6	4,5	6,084	6	10,0	1,410
7	9,8	3,369	7	12,9	8,898
8	5,5	7,750			
9	10,3	5,467			
Реперы [Points]	Отметка, м [Height, m]		Реперы [Points]	Отметка, м [Height, m]	
I	184,552		A	176,389	
II	191,284		B	181,308	
III	188,502		C	172,682	
			D	176,814	
			E	187,050	

Математические модели позволяют оценить влияние величин ошибок измерений на результаты уравнивания. В данных моделях веса звеньев остаются постоянными, а значения превышений и высотных отметок изменяются путем введения случайных ошибок из трех различных диапазонов: от -4 до $+4$ мм; от -12 до $+12$ мм; от -36 до $+36$ мм.

Распределение генерируемых ошибок подчиняется нормальному закону. Приняты следующие алгоритмы расчета приближенных координат узловых пунктов:

- по кратчайшему пути;
- по среднему значению;
- по средневзвешенному значению;
- по усредненному значению от всех исходных пунктов по короткому пути (для замкнутого полигона).

Для выполнения численных экспериментов составлены табличные формы для уравнивания выбранных сетей параметрическим методом и методом узлов профессора В.В. Попова в программе Excel. Реализации алгоритмов уравнивания представляют собой табличные формы с забитыми формулами для производства вычислений. Табличные формы состояли из трех основных групп: 1-я группа – форма исходных данных, 2-я группа – основные вычисления и 3-я группа – вывод результатов. Вычисления по методу профессора В.В. Попова выполнялись в следующей последовательности: определялись невязки по звеньям, их веса, невязки и веса узлов; составлялась матрица для расчета поправок к приближенным

значениям искомых величин. На заключительном этапе производилось вычисление уравненных значений высотных отметок узловых пунктов.

Реализация параметрического метода уравнивания была выполнена по аналогичной схеме.

Проверка корректности составленных моделей осуществлялась путем занесения в нее сгенерированных исходных данных. Программы показали нулевые невязки и нулевые поправки, то есть корректно обрабатывали модель.

В заданных диапазонах были сгенерированы по десять вариантов нивелировок. Для всех вариантов рассчитывались приближенные координаты по каждому указанному алгоритму каждым методом. По полученным значениям производилось уравнивание.

Так как известны истинные значения координат узловых пунктов, можно определить величины отклонений полученных значений от безошибочной модели.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что качество результатов уравнивания строгим методом полностью зависит от качества измерений, поскольку отклонения от истинных значений не превышают ошибку измерения (рис. 3).

В отличие от нестрогого метода на результат уравнивания строгим методом способ расчета приближенных отметок узлов не влияет (рис. 4 и 5).

При этом, очевидно, что самый оптимальный алгоритм расчета приближенной отметки нестрогим методом для полигонов и разомкнутых сетей – по средним значениям (рис. 5).

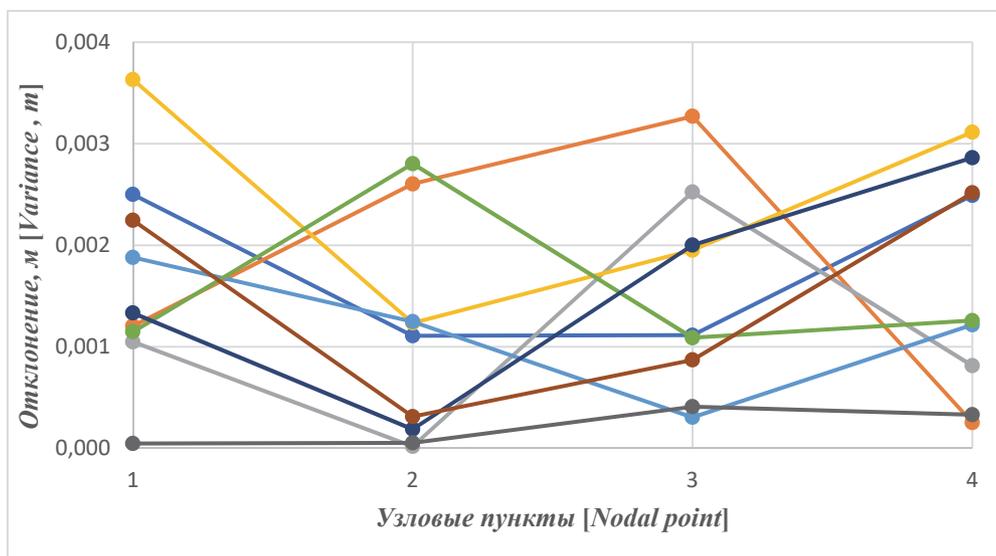


Рис. 3. Модули отклонений уравненных координат узловых пунктов от истинных значений для диапазона ошибок ± 4 мм, рассчитанных строгим методом
[Figure 3. Modules of deviations of the equalized coordinates of nodal points from the true values for the error range ± 4 mm, calculated by the strict method]

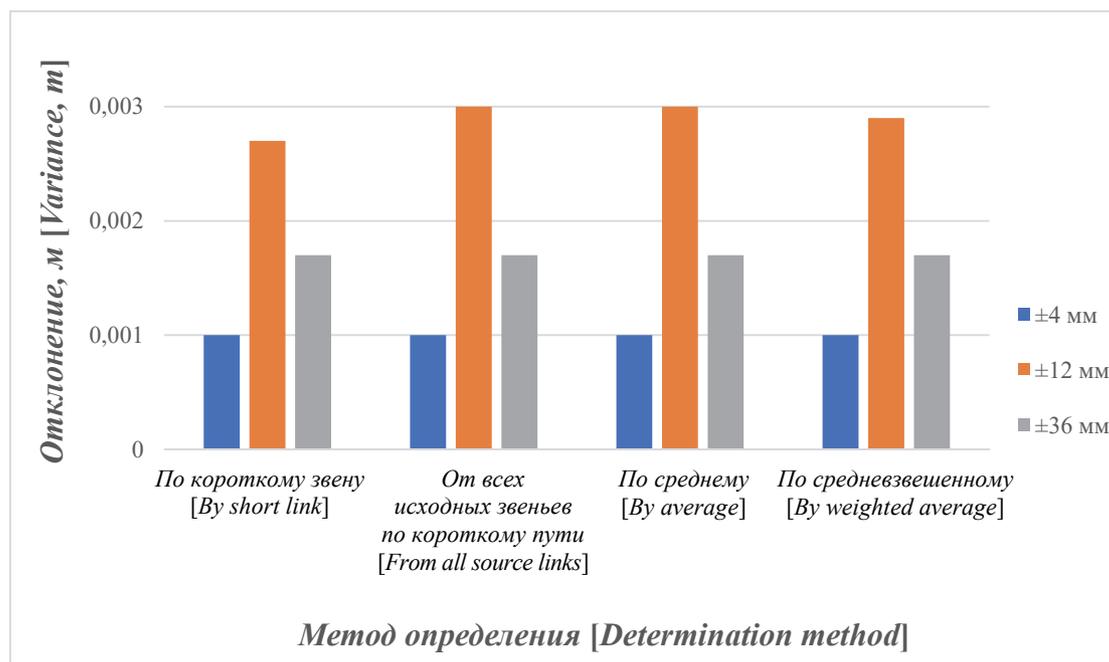


Рис. 4. Распределение модулей средних погрешностей строгого уравнивания в зависимости от метода определения приближенных отметок узловых пунктов
[Figure 4. Distribution of modules of average errors of strict equalization depending on the method of determining approximate marks of nodal points]

В случае, когда конфигурация сетей представляет собой набор разомкнутых ходов с узловыми пунктами, алгоритмы расчета по среднему и средневзвешенному значению сопоставимы (рис. 6).

Отклонения от истинных значений, полученных при расчете нестрогим методом, не превы-

шают двойной ошибки, закладываемой в расчет (рис. 4 и 5). Результаты уравнивания строгим и нестрогим методами зависят от качества измерений.

Используя следующие алгоритмы расчета приближенных отметок узловых пунктов для метода узлов профессора В.В. Попова, можно получить

результаты, аналогичные результатам, полученным строгими методами: для разомкнутых полигонов – по среднему значению, для замкнутых сетей – по усредненному значению от всех исходных

пунктов по короткому пути. Это позволяет упростить обработку данных мониторинга и оценку различных вариантов конфигурации сетей, используемых для мониторинга.

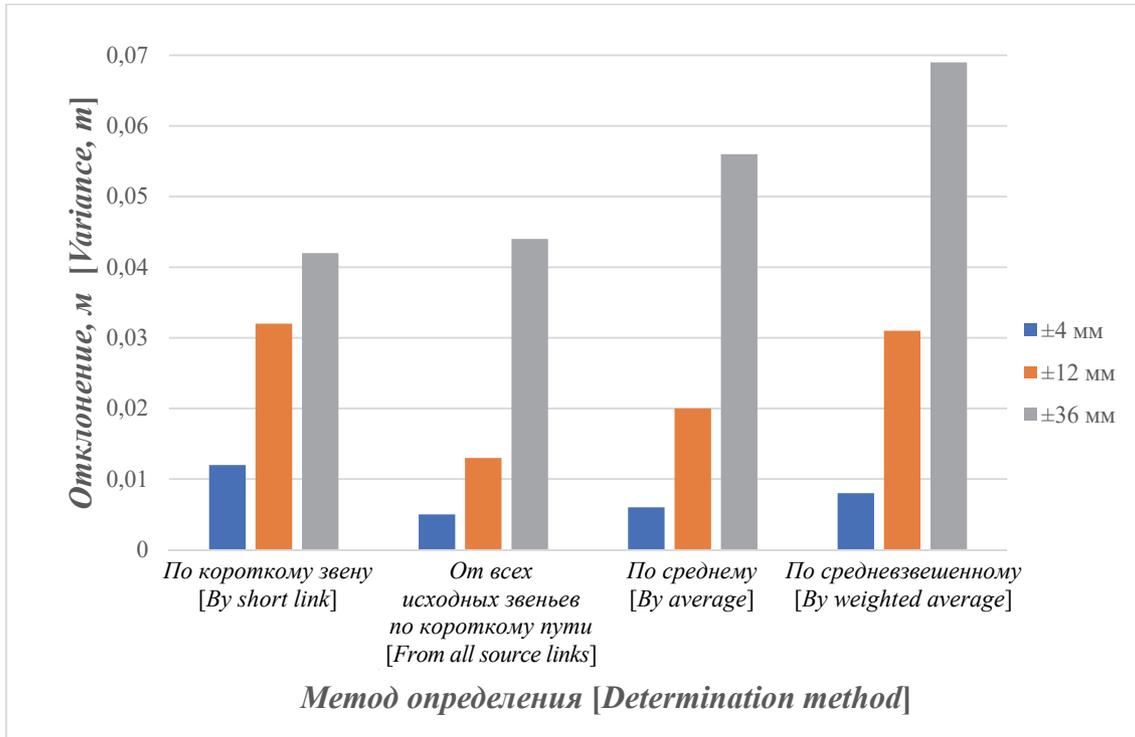


Рис. 5. Распределение модулей средних погрешностей нестрогого уравнивания замкнутых полигонов в зависимости от метода определения приближенных отметок узловых пунктов
[Figure 5. distribution of modules of average errors of non-strict equalization of closed polygons depending on the method of determining approximate marks of nodal points]

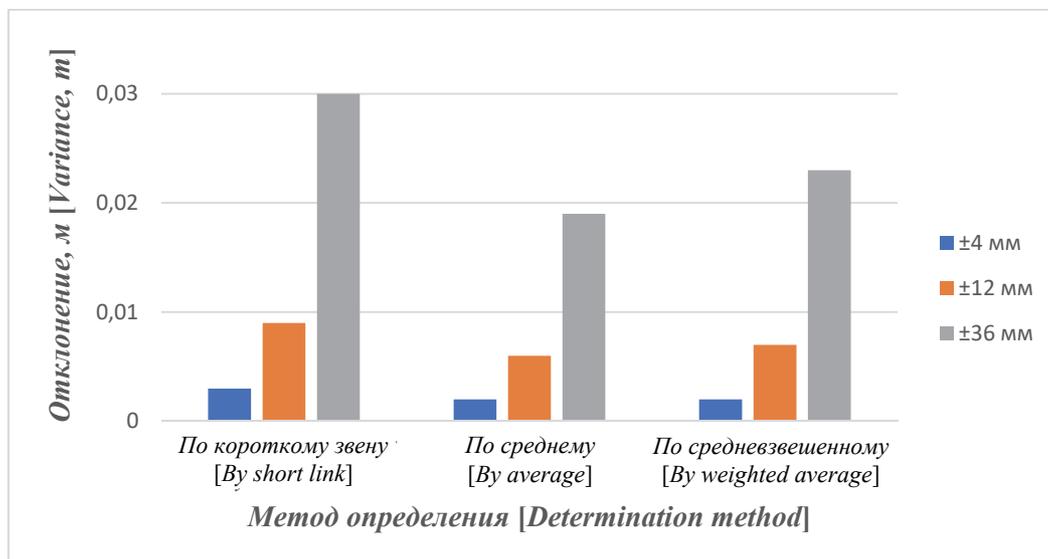


Рис. 6. Распределение модулей средних погрешностей нестрогого уравнивания разомкнутых полигонов в зависимости от метода определения приближенных отметок узловых пунктов
[Figure 6. Distribution of modules of average errors of non-strict equalization of open polygons depending on the method of determining approximate marks of nodal points]

Заключение

Выполненное обоснование способа расчета приближенных отметок узловых пунктов при уравнивании нивелирных сетей разными методами доказывает, что качество результатов уравнивания строгим методом полностью зависит от качества измерений, и в отличие от нестрогим метода на результат уравнивания строгим методом способ расчета приближенных отметок узлов не влияет. Определено, что оптимальным алгоритмом расчета приближенной отметки нестрогим методом для полигонов и разомкнутых сетей является расчет по средним значениям, а в случае, когда конфигурация сетей представляет собой набор разомкнутых ходов с узловыми пунктами, алгоритмы расчета по среднему и средне-взвешенному значению сопоставимы. Установлено, что отклонения от истинных значений, полученных при расчете нестрогим методом, не превышают двойной ошибки, закладываемой в расчет. Выполненные исследования показывают, что можно добиться упрощения обработки данных мониторинга и оценки различных вариантов конфигурации сетей, применяемых при мониторинге, используя алгоритмы расчета приближенных отметок узловых пунктов: для разомкнутых полигонов – по среднему значению, для замкнутых сетей – по усредненному значению от всех исходных пунктов по короткому пути. Это дает возможность упростить обработку результатов мониторинга и оценку различных вариантов конфигурации сетей при обеспечении требуемого уровня точности измерений.

Список литературы

1. Картозия Б.А. Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S1. С. 615–630.
2. Broere W. Urban problems – Underground solutions // Advances in Underground Space Development: Proceedings of the 13th World Conference of ACUUS. 2013. Pp. 1528–1539. doi: 10.3850/978-981-07-3757-3RP-087-P012.
3. Макишин В.Н., Николайчук Д.Н. Принципы формирования подземных транспортных систем мегаполисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S62. С. 39–43
4. Глозман О.С. Подземное планирование Москвы // Жилищное строительство. 2016. № 11. С. 14–19.

5. Трубецкой К.Н., Иофис М.А. Состояние и проблемы освоения подземного пространства города Москвы // Маркшейдерский вестник. 2007. № 4 (62). С. 27–30.

6. Иофис М.А., Негурица Д.Л. Мониторинг состояния сооружений при деформировании их основания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. № 10. С. 138–143.

7. Kaliampakos D. Underground development: a springboard to make city life better in the 21st century // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. Pp. 205–213.

8. Иофис М.А. Проблемы комплексного освоения территорий и подземного пространства крупных городов и пути их решения // Маркшейдерский вестник. 2006. № 4 (58). С. 20.

9. Колесникова Л.А. Экологические риски при создании объектов городской инфраструктуры в подземном пространстве // Уголь. 2018. № 3 (1104). С. 96–97.

10. Иофис М.А., Гришин А.В., Есина Е.Н. Сдвигение горных пород и земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых: учебное пособие. М.: РУДН, 2011. 103 с.

11. Терешин А.А., Негурица Д.Л., Кирков А.Е. Восстановление опорных реперов наблюдательных станций при деформационном мониторинге // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 1. С. 14–19.

12. Попов В.Н., Чекалин С.И. Геодезия: учебник. М.: Горная книга, 2012. 723 с.

13. Тамутис З.П. Проектирование инженерных геодезических сетей. М.: Недра, 1990. 138 с.

14. Altamimi Z., Gross R. Geodesy. Springer, 2017. Pp. 1039–1061. (Springer Handbooks).

15. Lehmann R., Neitzel F. Testing the compatibility of constraints for parameters of a geodetic adjustment model // Journal of Geodesy. 2013. Vol. 87. Issue 6. Pp. 555–566.

16. Velsink H. Testing methods for adjustment models with constraints // Journal of Surveying Engineering. 2018. Vol. 144. Issue 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000260)

17. Большаков В.Д., Маркузе Ю.И. Практикум по теории математической обработки геодезических измерений. М.: Недра, 1984. 345 с.

18. Беляев Б.И. Практикум по математической обработке маркшейдерско-геодезических измерений. М.: Недра, 1989. 316 с.

19. Ěvoltová, J., Chromčák, J. Diagnostics of systematic errors in angle measurements // Procedia Engineering. 2015. Vol. 111. Pp. 339–343. doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.098.

Для цитирования

Есина Е.Н., Лиходеевская В.В. Развитие методов уравнивания нивелирных сетей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 58–65. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-58-65>

Development of methods for equalizing level networks

Ekaterina N. Esina

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
6 Kryukovskiy Dead End, Moscow, 111020, Russian Federation

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

Vladislava V. Likhodeevskaya

LLC "SMU-6 Metrostroy", 29 Seleznevskaya St, bldg. 2, Moscow, 127473, Russian Federation

Article history:

Received: April 11, 2020

Revised: May 16, 2020

Accepted: May 18, 2020

Keywords:

geomonitoring, leveling networks, equalization, parametric equalization method, node method of Professor V.V. Popov

The article is devoted to comparison of methods of calculating the approximate elevations of nodal points when adjusting leveling networks by strict and non-strict methods. Ensuring geomechanical monitoring of the mutual influence of constructed and operated objects is important in the intensive development of underground space of megacities, the construction of unique objects and structures. In the course of the research, mathematical models of level networks were developed and presented in the form of a closed loop and a set of open polygons. Analysis of modeling allows to determine the feasibility of applying the knot method by Professor V.V. Popov instead of the parametric method of adjustment. It is established that the quality of the results of strict equalization depends entirely on the quality of measurements, since deviations from the true values do not exceed the measurement error. The research has shown that it is possible to simplify the processing of monitoring data and evaluation of various configuration options for leveling networks, using algorithms for calculating approximate marks of nodal points. This makes it easier to process monitoring results and evaluate various network configuration options while ensuring the required level of measurement accuracy.

References

1. Kartoziya BA. Osvoenie podzemnogo prostranstva krupnyh gorodov. Novye tendencii [Development of underground space of large cities. New trends]. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;(S1):615–630. (In Russ.)
2. Broere W. Urban problems – underground solutions. *Advances in Underground Space Development: Proceedings of the 13th World Conference of ACUUS*. 2013. p. 1528–1539. doi: 10.3850/978-981-07-3757-3RP-087-P012.
3. Makishin VN, Nikolaichuk DN. Principy formirovaniya podzemnyh transportnyh sistem megapolisov [Principles of formation of underground transport systems of megalopolises]. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018;(S62):39–43. (In Russ.)
4. Glozman OS. Podzemnoe planirovanie Moskvy [Underground planning of Moscow]. *Housing construction*. 2016;(11):14–19. (In Russ.)

5. Trubetskoy KN, Iofis MA. Sostoyanie i problemy osvoeniya podzemnogo prostranstva goroda Moskvy [State and problems of development of the Moscow underground space]. *Mine Surveying Bulletin*. 2007;4(62):27–30. (In Russ.)
6. Iofis MA, Neguritsa DL. Monitoring sostoyaniya sooruzhenij pri deformirovanii ih osnovaniya [Monitoring of structures during deformation of their base]. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2006;(10):138–143. (In Russ.)
7. Kaliampakos D. Underground development: a springboard to make city life better in the 21st century. *Procedia Engineering*. 2016;165:205–213.
8. Iofis MA. Problemy kompleksnogo osvoeniya territorij i podzemnogo prostranstva krupnyh gorodov i puti ih resheniya [Problems of complex development of territories and underground space of metropolis and ways to solve them]. *Mine Surveying Bulletin*. 2006;4(58):20. (In Russ.)
9. Kolesnikova LA. Ekologicheskie riski pri sozdanii ob"ektov gorodskoj infrastruktury v podzemnom prostranstve [Environmental risks in the creation of urban infrastructure in the underground space]. *Coal*. 2018;3(1104):96–97. (In Russ.)
10. Iofis MA, Grishin AV, Esina EN. *Sdvizhenie gornyh porod i zemnoj poverhnosti pri razrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh* [The displacement of rocks and the Earth's

Ekaterina N. Esina, senior researcher of ICEMR RAS, associate professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Web of Science ResearcherID: E-6092-2017, eLIBRARY SPIN-code: 9090-9868, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1685-2406>, esina-en@rudn.ru
Vladislava V. Likhodeevskaya, shift surveyor of LLC "SMU-6 Metrostroy".

surface during the development of mineral deposits]: textbook. Moscow: RUDN University; 2011. (In Russ.)

11. Tereshin AA, Neguritsa DL, Kirkov AE. Vostanovlenie opornyh reperov nablyudatel'nyh stancij pri deformatsionnom monitoringe [Restoration of reference points of observation stations during deformation monitoring]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017; 18(1):14–19. (In Russ.)

12. Popov VN. *Geodeziya* [Geodesy]: textbook. Moscow: Gornaya kniga Publ.; 2012. (In Russ.)

13. Tamutis ZP. *Proektirovanie inzhenernyh geodezicheskikh setej* [Design of engineering geodetic networks]. Moscow: Nedra Publ.; 1990. (In Russ.)

14. Altamimi Z, Gross R. *Geodesy*. Springer Handbooks. Springer; 2017. p. 1039–1061.

15. Lehmann R, Neitzel F. Testing the compatibility of constraints for parameters of a geodetic adjustment model. *Journal of Geodesy*. 2013;87(6):555–566.

16. Velsink H. Testing methods for adjustment models with constraints. *Journal of Surveying Engineering*.

2018;144(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000260](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000260)

17. Bolshakov VD, Markuse YuI. *Praktikum po teorii matematicheskoy obrabotki geodezicheskikh izmerenij* [Practicum of the theory of mathematical processing of geodetic measurements]. Moscow: Nedra Publ.; 1984. (In Russ.)

18. Belyaev BI. *Praktikum po matematicheskoy obrabotke markshejdersko-geodezicheskikh izmerenij* [Practicum of mathematical processing of surveying and geodesic measurements]. Moscow: Nedra Publ.; 1989. (In Russ.)

19. Ižvoltová J, Chromčák J. Diagnostics of systematic errors in angle measurements. *Procedia Engineering*. 2015;111:339–343. doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.098.

For citation

Esina EN, Likhodeevskaya VV. Development of methods for equalizing level networks. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):58–65. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-58-65> (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-66-80

УДК 622.276.53.054.23:621.67-83

Научная статья

Перспективы добычи вязкой жидкости установками скважинных электроприводных лопастных насосов (УЭЛН)

Ш.Р. Агеев, Е.Ю. Дружинин, Р.С. Камалетдинов

ОП ОКББН АО «Новомет-Пермь», Российская Федерация, 115201, Москва, Каширский пр-д, 21

История статьи:

Поступила в редакцию: 25 мая 2020 г.

Доработана: 31 мая 2020 г.

Принята к публикации: 1 июня 2020 г.

Ключевые слова:

лопастной насос, добыча нефти, высокая частота вращения, высокая вязкость, КПД, открытое рабочее колесо, проточная часть, треугольник скоростей, гелико-осевой насос, НКТ

В статье рассмотрены вопросы перспективы освоения значительных мировых запасов высоковязкой нефти (ВВН). Для ее добычи требуются специфичное оборудование и технологии, подбор эффективного оборудования, а также особый подход при его эксплуатации. При этом следует учитывать влияние повышенной вязкости на основные характеристики насосов и условия эксплуатации оборудования в скважине. Описаны причины нестабильной работы установок скважинных электроприводных лопастных насосов (УЭЛН) при запуске после длительных остановок. Предложены методики пересчета характеристик насосов для добычи нефти распространенной конструкции. Приведены некоторые результаты исследований таких насосов на вязкой жидкости, в том числе рекомендации по расчету проточной части. Определены возможности насосов со ступенями с открытыми рабочими колесами и повышенными частотами вращения вала. Указаны дополнительные причины снижения характеристик насоса на вязкой жидкости, продемонстрированы результаты испытания сборки ступеней с измерением осредненных окружных составляющих скоростей потока при разных вязкостях перекачиваемой жидкости. Рассмотрена также возможность использования гелико-осевых насосов. Рекомендовано применение современных программ и методик подбора оборудования и его эксплуатации, регулирование частоты вращения ротора УЭЛН и температуры жидкости в НКТ, автоматизация всего процесса добычи нефти. Представлены возможные конструктивные изменения УЭЛН при добыче ВВН с целью повышения их эффективности по сравнению с серийными. Статья может быть полезной специалистам по проектированию, подбору и эксплуатации оборудования для добычи высоковязкой нефти.

Введение

К высоковязким (ВВН) условно относят нефти вязкостью более 30 мПа·с. В настоящее время доля таких запасов сырья значительно увеличилась. По некоторым оценкам они в 5 раз превышают

запасы нефти малой вязкости и расположены на территории нескольких государств, среди которых и Россия. Нефтяные компании не случайно проявляют интерес к разработке таких месторождений. Мировой объем производства ВВН в настоящее время достигает нескольких сотен миллионов тонн в год.

РФ обладает значительными запасами нефти, в том числе высоковязкой. Примерно 2/3 запасов высоковязких нефтей имеют вязкость 30–100 мПа·с, а 1/4 – от 100 до 500 мПа·с [1; 2].

Следует отметить, что наличие воды в ВВН ведет к образованию эмульсий, вязкость которых при содержании воды от 20 до 50 % может в

Агеев Шарифжан Рахимович, заведующий отделом прикладной гидродинамики ОП ОКББН АО «Новомет-Пермь».

Дружинин Евгений Юрьевич, заведующий сектором гидродинамики ОП ОКББН АО «Новомет-Пермь».

Камалетдинов Рустам Сагарьярович, заместитель директора департамента инновационных разработок ОП ОКББН АО «Новомет-Пермь», кандидат технических наук, Rustam.Kamaletdinov@novometgroup.com

© Агеев Ш.Р., Дружинин Е.Ю., Камалетдинов Р.С., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

5÷10 раз превысить величину вязкости ВВН в безводном состоянии. Это обстоятельство следует учитывать при подборе оборудования для откачки обводненной ВВН.

Разработки залежей ВВН требуют применения специфической техники и технологий. По мнению многих специалистов, наиболее подходящим оборудованием для добычи высоковязкой нефти являются установки с объемными насосами. Для этой цели применяют установки винтовых электронасосов (УЭВН), установки глубинных штанговых насосов и созданные АО «Новомет» установки объемно-роторных насосов. Винтовые насосы применяются для добычи пластовой жидкости с вязкостью до 10 000 сСт, объемно-роторные – до 5000 сСт.

Установки скважинных электроприводных лопастных насосов (УЭЛН) также используются при откачке вязкой нефти, но ограниченно.

Рассмотрим подробнее применение и технические возможности УЭЛН для добычи высоковязкой нефти как наиболее надежных и востребованных в нефтепромысловой практике РФ.

1. Возможности УЭЛН, выпускаемых серийно

Общеизвестно, что параметры (подача, напор, КПД) лопастного насоса при повышении вязкости перекачиваемой жидкости снижаются. Лопастные насосы разрабатываются применительно к работе на воде, а при перекачке вязкой жидкости характеристики насоса пересчитываются на необходимую вязкость.

Для этой цели в РФ в большинстве случаев используется наиболее распространенный применительно к погружным центробежным и диагональным насосам для добычи нефти способ пересчета характеристик насоса с воды на жидкость любой вязкости, разработанный П.Д. Ляпковым [3; 4].

Способ получен на основе экспериментов на однородных жидкостях различной вязкости и основан на использовании числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{\sqrt[3]{Q_{в.опт}^2} \omega}{\nu}, \quad (1)$$

где $Q_{в.опт}$ – оптимальная подача насоса на воде при нормальных условиях, м³/с; ω – угловая скорость вращения рабочего колеса, рад/с; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

По способу П.Д. Ляпкова в виде номограмм представлены изменения в зависимости от числа Рейнольдса относительных параметров ступени погружного лопастного насоса:

– подачи оптимального режима:

$$K_Q = \frac{Q_{в.опт}}{Q_{в.опт}}; \quad (2)$$

– напора в сходственных режимах:

$$K_H = \frac{H_v}{H_b}; \quad (3)$$

– КПД в сходственных режимах:

$$K_{\eta} = \frac{\eta_v}{\eta_b}, \quad (4)$$

где $Q_{в.опт}$ – подача насоса на оптимальном режиме на вязкой жидкости, м³/с; H_v – напор насоса на вязкой жидкости; η_v – КПД насоса на вязкой жидкости.

По найденным по номограмме относительным параметрам K_Q , K_H , K_{η} можно вычислить в интервале подач $0,4 \leq Q_{в.опт}/Q_{в.опт} \leq 1,4$ характеристики $H_v - Q_v$, $\eta_v - Q_v$.

Аппроксимирующие формулы к способу П.Д. Ляпкова приведены в [5]. Используя метод П.Д. Ляпкова, расчетным способом были получены относительные подачи оптимального режима ступеней различной производительности в зависимости от вязкости перекачиваемой жидкости (рис. 1).

Из полученных зависимостей следует, что:

– при повышении вязкости откачиваемой жидкости снижаются напорная и энергетическая характеристики насоса (рис. 2);

– уровень снижения параметров насоса от вязкости зависит от производительности насоса: чем выше производительность насоса, тем снижение этих параметров будет меньше. Например, снижение значения оптимальной подачи насосов вдвое произойдет у насосов разной производительности при следующих значениях кинематической вязкости (Q , м³/сут – ν , мм²/с): 25 – 81, 50 – 129, 80 – 176, 125 – 237, 160 – 280, 250 – 376, 320 – 444, 400 – 515, 500 – 598, 700 – 748, 800 – 817.

На рис. 3 приведена расчетная номограмма, по которой можно определить, ступени какой производительности следует взять для откачки вязкой жидкости конкретной подачи и какое при этом снижение оптимальной подачи насоса следует ожидать.

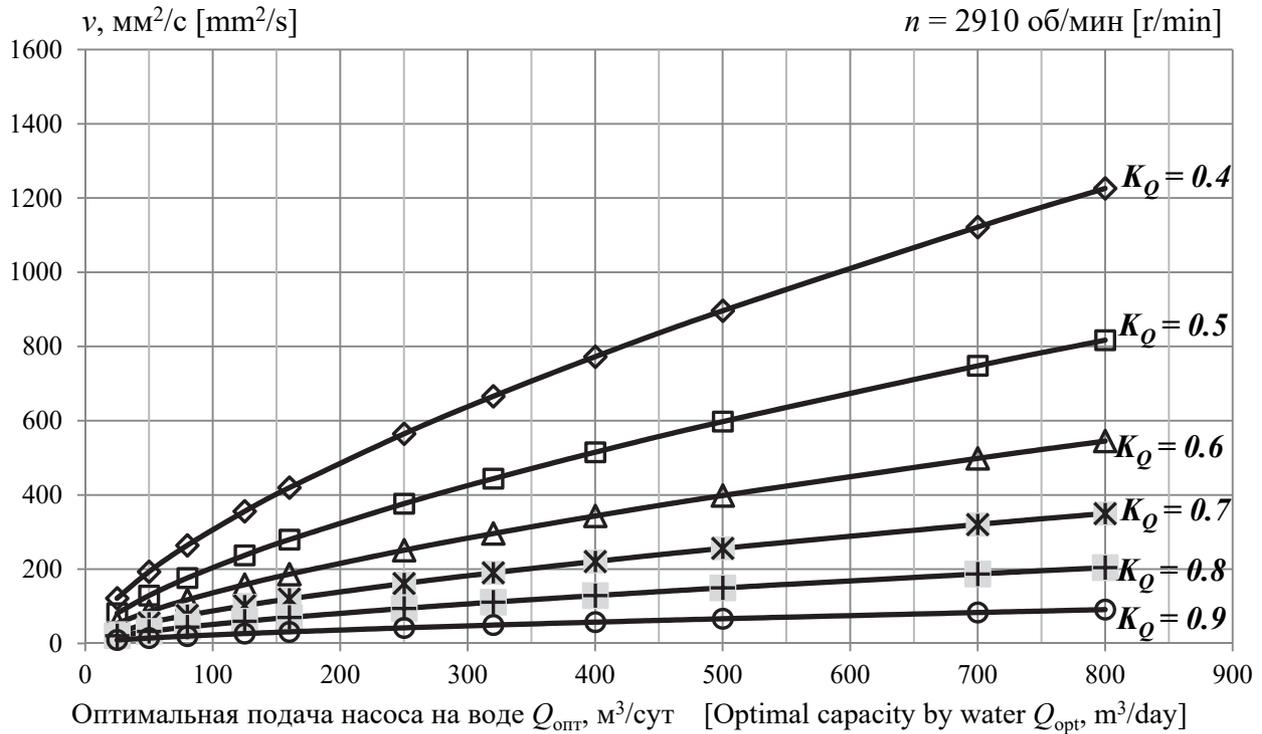


Рис. 1. Относительное снижение подачи оптимального режима (K_Q) на вязкой жидкости ступеней серийных УЭЛН различной производительности, рассчитанных на воду
[Figure 1. The relative decrease in the supply of the optimal capacity (K_Q) on a viscous fluid of the single-stages of serial ESP of different capacities, designed for water]

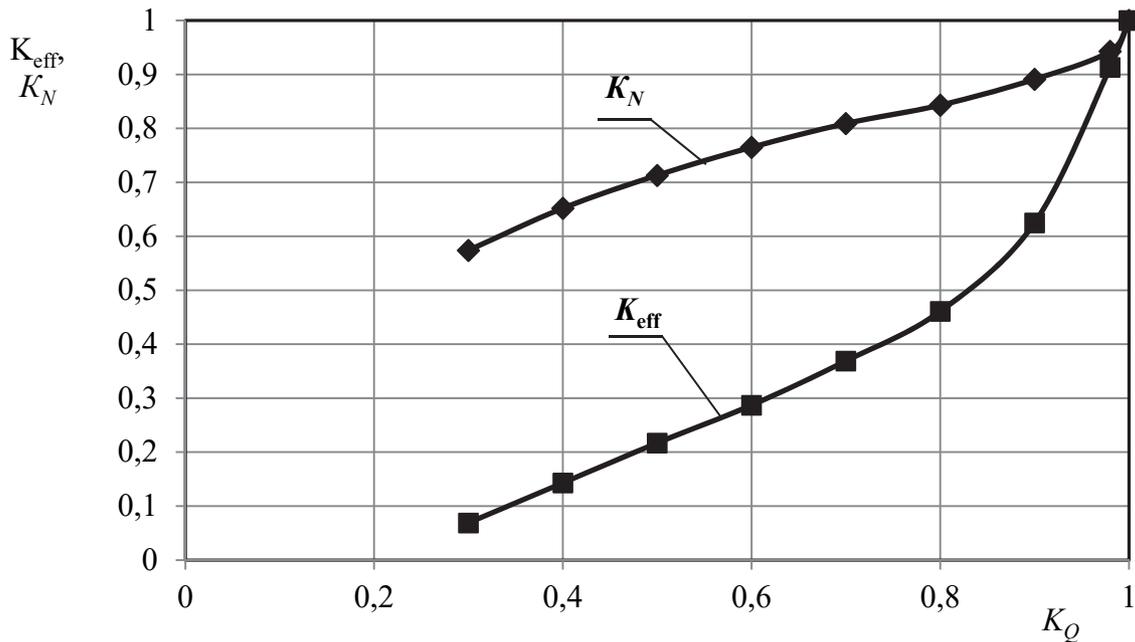


Рис. 2. Зависимость коэффициентов $K_{\text{кпд}}, K_N$ от коэффициента K_Q
[Figure 2. The dependence of the coefficients K_{eff}, K_N on the coefficient K_Q]

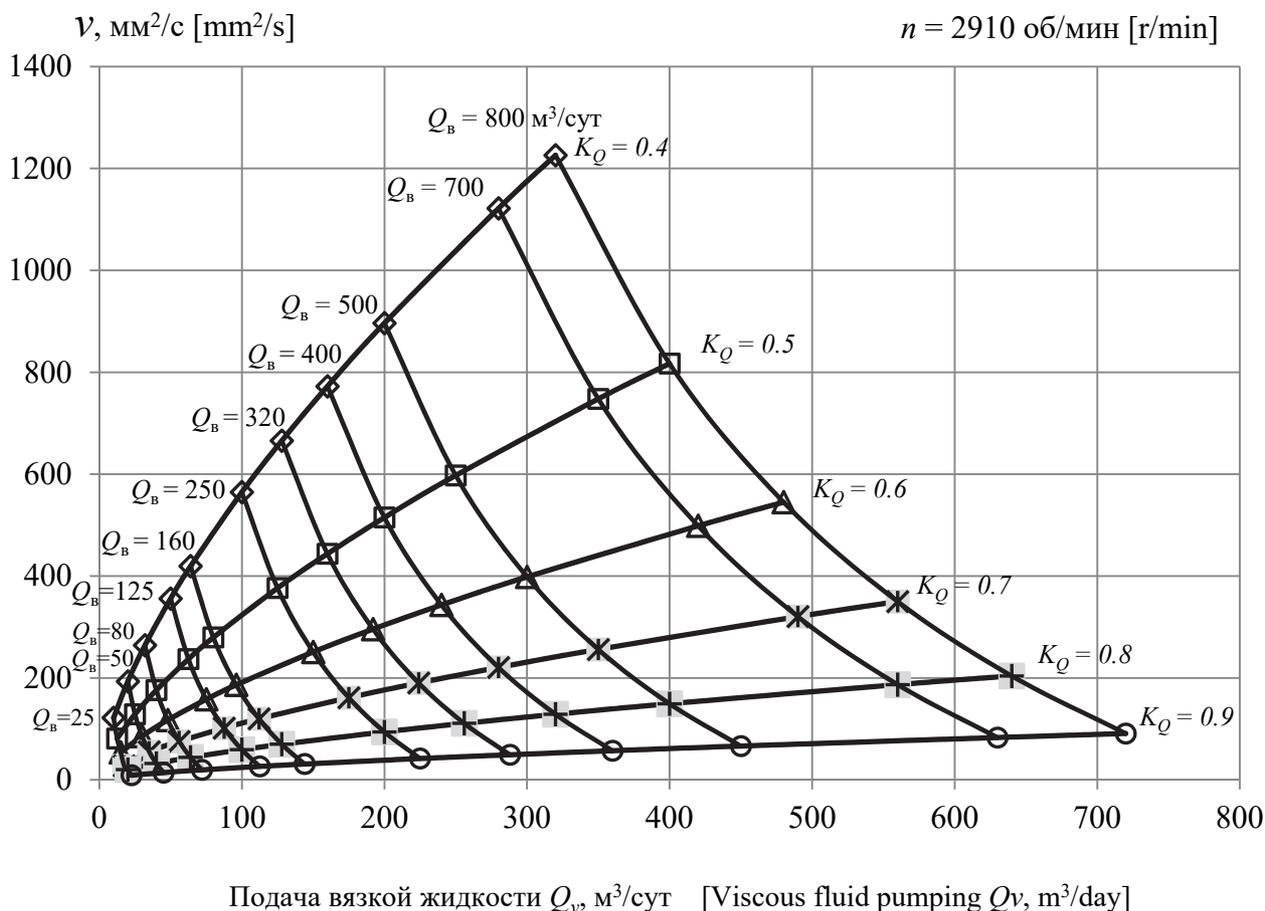


Рис. 3. Предельные значения вязкости жидкости при откачке серийными насосами УЭЛН
 [Figure 3. Limit values of fluid viscosity during pumping by serial ESP pumps]

Нужно отметить, что приведенные зависимости относительных параметров относятся к ступеням насосов, а не к самим многоступенчатым насосам. В таких насосах температура вязкой жидкости по мере продвижения по длине насоса повышается, что влечет снижение вязкости. Для корректного расчета вычисляются характеристики каждой ступени насоса, а характеристики насоса должны быть определены как сумма характеристик всех ступеней насоса.

До недавнего времени при применении асинхронных двигателей установки УЭЛН не находили большого применения при откачке вязкой нефти из-за отсутствия стабильного запуска после длительных остановок, во время которых происходил перегрев двигателя.

Нестабильная работа установки при запуске УЭЛН после длительных остановок наблюдается по следующим причинам:

1) вязкость нефти значительно зависит от температуры. Гидравлическое сопротивление в НКТ и скважине в начальной стадии после запуска достаточно большое и потребный напор насоса значителен. Требуется довольно много времени для повышения и стабилизации температуры по всей системе «скважина – УЭЛН – НКТ»;

2) из-за нестабильного запуска происходит перегрев погружного двигателя. Используемые в нефтедобыче станции управления с частотным регулированием и погружные вентиляционные двигатели позволяют производить плавный пуск установки УЭЛН и регулирование режима работы установки;

3) кроме того, при необходимости возможно организовать подогрев электрическими нагревателями застывшего вязкого столба жидкости в НКТ для обеспечения процесса освоения скважины после простоя.

2. Возможности насосов со ступенями с открытыми рабочими колесами

По экспериментальным работам Особого конструкторского бюро бесштанговых насосов (ОКБ БН) известно, что характеристики ступеней с открытыми рабочими колесами менее чувствительны к повышению вязкости жидкости, чем ступени традиционной конструкции – с закрытыми рабочими колесами. Это объясняется уменьшением объемных потерь в зазорах и уменьшением дисковых потерь в ступенях с открытыми рабочими колесами при повышении вязкости.

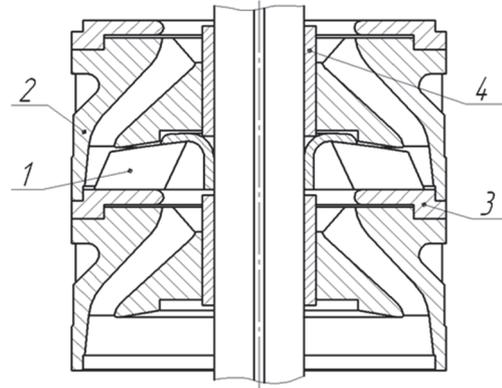


Рис. 4. Ступень СН5А-250 с открытым рабочим колесом [Figure 4. Single-stage with open impeller]

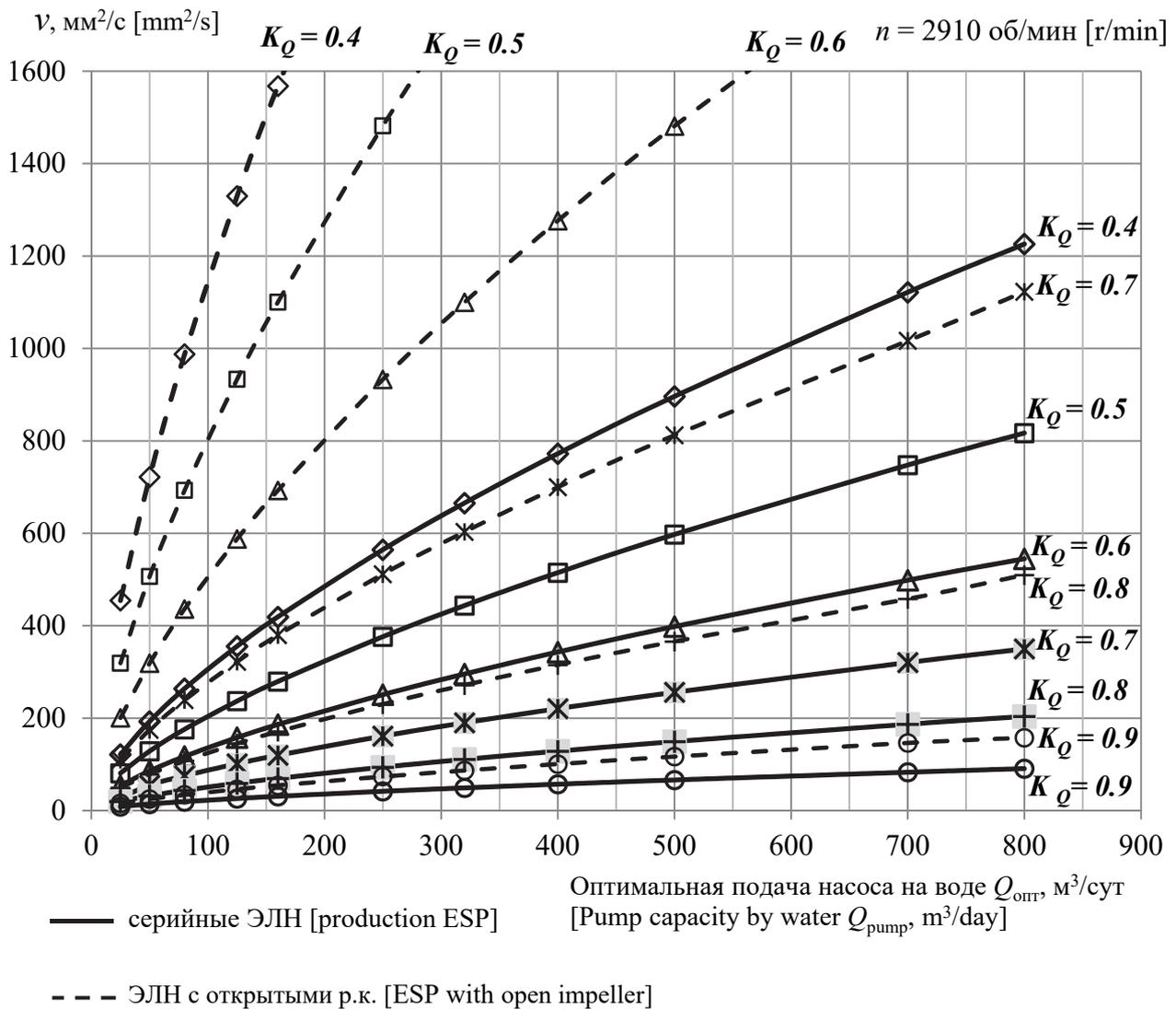


Рис. 5. Предельные значения вязкости жидкости при откачке насосами УЭЛН [Figure 5. Limit values of fluid viscosity during ESP pumping]

В 60–80 гг. прошлого века в ОКБ БН было разработано большое количество ступеней с открытыми рабочими колесами [6]. Отличия конструкций этих ступеней (рис. 4):

- нижний диск колеса отсутствует;
- величина верхнего диска колеса максимально уменьшена;
- плавающие рабочие колеса торцами своих лопастей свободно лежат на дисках направляющих аппаратов или на износостойких дисках;
- зазор между верхним торцом лопастей рабочего колеса и стенками рабочей камеры порядка 0,3 мм.

В результате исследований на водоглицериновых растворах экспериментально установлено, что при откачке вязкой жидкости подача и напор сходственных режимов ступеней с открытыми рабочими колесами снижаются меньше при увеличении вязкости по сравнению со случаем откачки ступенями с такими же параметрами, но с закрытыми рабочими колесами.

Для ступеней насосов с открытыми рабочими колесами коэффициенты изменения подачи $K_Q^{отк}$, напора $K_H^{отк}$ и КПД $K_{КПД}^{отк}$ оптимального режима относительно водяной характеристики приблизительно можно оценить по характеристикам на рис. 5.

Расчеты по определению характеристик насосов на вязкой жидкости (рис. 5) показали, что при одинаковых параметрах характеристики насосов с открытыми рабочими колесами менее чувствительны к повышению вязкости откачиваемой жидкости по сравнению с насосами с закрытыми рабочими колесами.

Следует отметить, что меньшее влияние вязкости было получено для конструкции ступеней с открытыми рабочими колесами с вышеприведенными отличиями.

3. Возможности насосов с повышенными частотами вращения вала

Число Рейнольдса является базовым критерием при вычислении влияния вязкости на напор и потребляемую мощность насоса. Удобно так записать этот критерий подобия, чтобы он зависел от оптимальной подачи насоса, угловой скорости вращения его вала и вязкости рабочей жидкости.

Таким образом, можно сделать вывод, что для работы с вязкой жидкостью более эффективны

насосы с повышенной частотой вращения вала. Для работы с ВВН целесообразно использовать насосы с максимально возможной частотой вращения по сравнению с серийными насосами с частотой вращения 3000 об/мин (синхронная). Так, у насосов 5А-500 при перекачке жидкости вязкостью 320 сСт оптимальная подача, напор и КПД при частоте вращения 5820 об/мин увеличатся по сравнению с частотой вращения 2910 об/мин на 7,7; 3 и 12,6 % соответственно.

4. Возможности конструктивных изменений насоса

В мировой промышленной практике имеются попытки изменения традиционной конструкции ступеней насосов для повышения эффективности откачки нефти, а именно – путем использования специальных конструкций ступени [7].

На промыслах Венесуэлы в начале 2000-х гг. был использован лопастной насос 562-V30 фирмы Centrilift со ступенями, конструктивно отличающимися от традиционной конструкции. Имели место следующие изменения конструкции ступени: максимальное уменьшение протяженности проточных трактов с целью сокращения гидравлических потерь за счет замены диагональной конструкции направляющего аппарата ступени осерадиальной, повышение высоты каналов колеса и аппарата, увеличение углов лопастей рабочих колес.

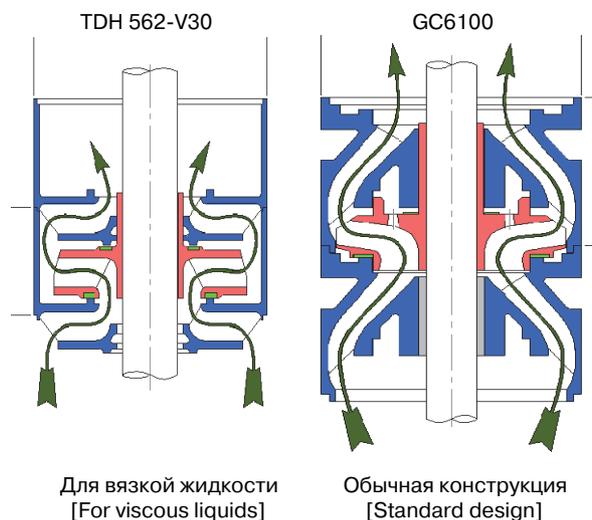


Рис. 6. Конструктивные изменения ступени для откачки вязкой жидкости [Figure 6. Single-stage design changes for viscous fluid pumping]



Рис. 7. Изменения формы лопастей рабочего колеса
[Figure 7. Changes of impeller blades shape]

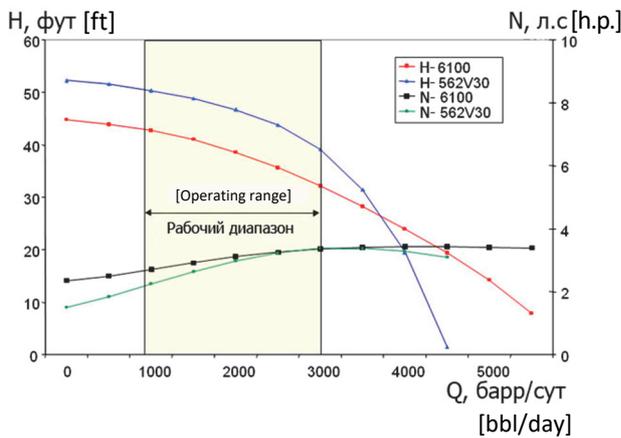


Рис. 8. Сравнительные характеристики насосов обычной и измененной конструкции
[Figure 8. Comparative characteristics of pumps in standard and modified design]

В результате проведенных теоретических и экспериментальных работ было определено, что при применении инновационного насоса 562-V30 при откачке нефти с вязкостью более 500 сП мощность уменьшается на 14–29 % по сравнению с серийным насосом GC-6100. Этот насос при работе на воде был неэффективен по сравнению с традиционным, но при работе на вязкой жидкости практически не снижал напорную характеристику по сравнению с серийным насосом GC-6100 (рис. 6–8).

5. Определение дополнительных причин снижения характеристик насоса

Изучением влияния вязкости жидкости на характеристику лопастных насосов специалисты занимаются более 70 лет [8–10; 3].

В результате всех проведенных исследований не были определены закономерности изменения уравнения теоретического напора (основного уравнения взаимодействия рабочего колеса лопастного насоса с вязкой жидкостью). Считалось, что теоретический напор насоса не зависит от вязкости перекачиваемой жидкости.

Для возможных уточнений рассмотрим уравнение теоретического напора при перекачивании лопастным насосом вязкой жидкости, определяемое скоростями и углами потока в характерных сечениях ступени УЭЛН – на входе и выходе рабочего колеса и направляющего аппарата, на примере осерадиального типа ступени, наиболее широко используемого в лопастных насосах для добычи нефти.

В инженерной практике при проектировании и расчете ступени насоса на идеальную жидкость (воду) применяют выражение теоретического напора ступени, называемое основным уравнением, полученным на основе уравнения Эйлера [11]:

$$H_T = \frac{\omega}{g} (1 - \kappa) \left[r_a^2 \omega - \frac{Q}{2\pi b_2 \psi_2 \tan \beta_{2л}} - \kappa_1 \right], \quad (5)$$

где κ – коэффициент прозрачности решетки колеса, обычно $\kappa = 0$; $\beta_{2л}$ – выходной угол лопасти колеса; $\kappa_1 = (r v_u)_1$ – момент скорости на входе в колесо, определяемый конструкцией направляющего аппарата; r_a – «активный» радиус решетки колеса, $r_a^2 = y R_2^2$.

Коэффициент y определяется различными методами, основанными на гипотезах и упрощениях. Наиболее распространенным применительно к работе насоса на идеальной жидкости (воде) является метод Стодола – Майзеля:

$$y = 1 - \frac{\pi \sin \beta_{2л}}{z}, \quad (6)$$

где z – число лопастей колеса; ω – частота вращения колеса; R_2 – радиус наружного диаметра колеса; Q – подача; b_2 – высота канала на выходе колеса; ψ_2 – коэффициент стеснения на выходе колеса.

По методу Стодола – Майзеля [12], относительный поток в межлопастных каналах складывается из двух составляющих: потока протекания (I) и потока относительного вихря (II) (рис. 9, а). Поток II направлен против вращения рабочего колеса, из-за чего на входе и выходе межлопаст-

При перекачке ступенью вязкой жидкости, естественно, дополнительные скорости Δw_1 и Δw_2 должны уменьшаться, что приводит к повышению скорости v_{2u} и увеличению угла потока на выходе рабочего колеса.

Для проверки этого предположения были проведены испытания сборки ступеней с измерением осредненных окружных составляющих скоростей потока при разных вязкостях перекачиваемой жидкости. Использовалась широко применяемая ступень СН6-160ИМА с осерадиальным направляющим аппаратом и плавающим рабочим колесом со средними кинематическими вязкостями (глицерин) (рис. 10). Методика измерений основана на замерах гидродинамического момента, действующего на решетку направляющего аппарата и измерительную решетку с радиальными лопатками (пластинами), расположенную на выходе направляющего аппарата, при прохождении через них потока жидкости, так называемым методом взвешивания [13].

Применительно к направляющему аппарату сущность метода основана на взаимодействии потока с его решеткой. При этом направляющий аппарат будет испытывать вполне определенный гидродинамический момент относительно своей центральной оси:

$$M = \frac{\gamma}{g} * \frac{Q}{2\pi} (\Gamma_3 - \Gamma_4), \quad (7)$$

где Q – расход жидкости, проходящей через направляющий аппарат, m^3/c ; γ – удельный вес жидкости, $кг/м^3$; Γ_3 и Γ_4 – осредненные значения циркуляции на выходе из рабочего колеса и на выходе из решетки аппарата соответственно, $м^2/сек$.

Для определения разности циркуляций обойма направляющего аппарата была выполнена из двух частей: подвижной и неподвижной (рис. 11). Подвижная часть была жестко соединена с решеткой исследуемого направляющего аппарата. Поэтому измеряемый момент был пропорционален разности осредненных циркуляций на выходе из рабочего колеса и выходе из направляющего аппарата.

Момент, действующий на аппарат, замерялся тензометрическим методом, а именно: решетка направляющего аппарата была посажена на подшипник качения и момент, действующий на аппарат, передавался на жестко связанную с ним пластину с наклеенными на ней тензодатчиками.

Сигналы с тензодатчиков передавались на тензометрическую аппаратуру. В результате экспе-

риментов обнаружено, что величина утечки через зазор между направляющим аппаратом и нижним корпусом подшипника пренебрежительно мала.

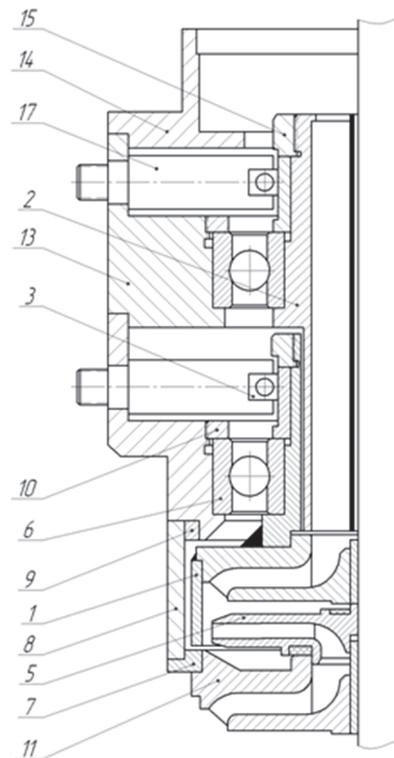


Рис. 11. Узел для измерения циркуляций
[Figure 11. Circulations measuring node]

Экспериментально найденная зависимость $H_T^{пл} = f(Q)$ для ступени с плавающим колесом приведена на рис. 12.

Для замера осредненных окружных составляющих скоростей на выходе направляющего аппарата за последним направляющим аппаратом сборки ступеней ставится решетка с радиальными лопатками (пластинами). Количество пластин и их осевая длина должны быть достаточными, чтобы решетка была непрозрачной, то есть окружная составляющая скорости потока на выходе решетки была равна нулю. Эта измерительная решетка посажена на подшипник качения. Момент, действующий на решетку, передается на жестко связанную с ним пластину с наклеенными на нее тензодатчиками (рис. 11). Сигналы с тензодатчиков транслируются на тензометрическую аппаратуру. По замеренному гидродинамическому моменту можно определить осредненные значения циркуляции на выходе направляющего аппарата на каждой подаче:

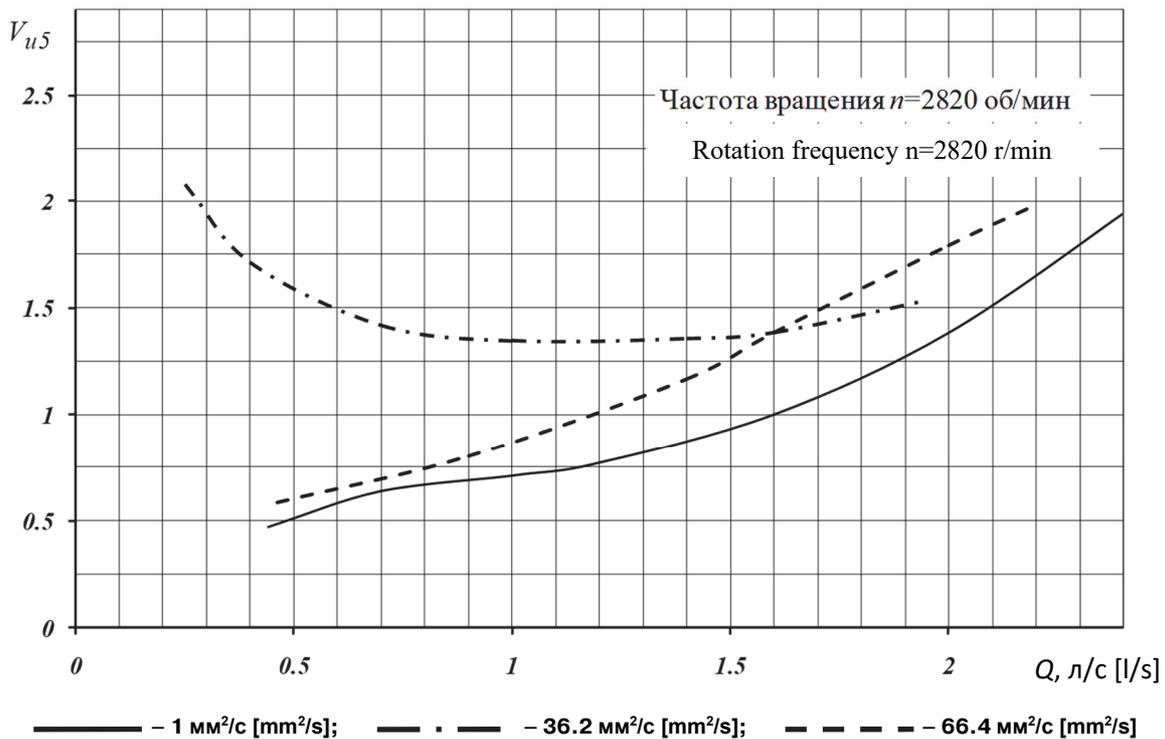


Рис. 14. Влияние вязкости на окружную составляющую скорость на выходе из направляющего аппарата ступени SN6-160 IMA
[Figure 14. The effect of viscosity on the peripheral velocity component at the outlet of guide apparatus of SN6-160 IMA single-stage]

Проведенные балансовые испытания ступени продемонстрировали следующее:

1) зависимости осредненной окружной составляющей скорости потока на выходе из аппарата (на входе рабочего колеса) при повышении вязкости жидкости изменились несущественно;

2) уровни зависимости осредненной окружной составляющей скорости потока на выходе из колеса существенно повысились при увеличении вязкости перекачиваемой жидкости. Это, по-видимому, произошло из-за увеличения «активного» радиуса рабочего колеса при увеличении вязкости перекачиваемой жидкости. Причем это увеличение возрастает при уменьшении подачи;

3) при повышении окружной составляющей скорости потока на выходе рабочего колеса (на входе направляющего аппарата) уменьшаются углы наклона потока на входе направляющего аппарата и увеличиваются зоны вихреобразования в межлопаточных каналах аппарата, что приводит к дополнительным гидравлическим потерям;

4) чем сильнее увеличение составляющей окружной скорости потока при уменьшении пода-

чи, тем интенсивнее снижение оптимальной подачи, напора и КПД на этих подачах при повышении вязкости жидкости, что, естественно, уменьшает допустимую вязкость для этого насоса.

Повышение вязкости привело к увеличению зоны вихреобразования в межлопаточных каналах направляющего аппарата, а следовательно, к дополнительным гидравлическим потерям. Таким образом, можно утверждать, что при разработке ступени насоса на конкретную вязкость перекачиваемой жидкости возможно избежать дополнительных гидравлических потерь. Это привело бы к повышению эффективности насосов, повышению оптимальной подачи, напора и КПД при откачке вязкой жидкости по сравнению с существующими методиками (например, разработки насосов (ступеней) на воду с последующим пересчетом водяной характеристики на вязкую при использовании насоса на вязкой жидкости). При проектировании ступени на вязкую жидкость целесообразен рациональный выбор величины «активного» выходного диаметра рабочего колеса, определяемой посредством активных и пассивных экспериментов.

6. Возможности гелико-осевых насосов

Гелико-осевой многофазный насос был впервые разработан в конце 1980-х – 1990-х гг. для подводной эксплуатации группой компаний.

Гелико-осевая ступень состоит из ротора и статора со спиральными (винтовыми) лопатками. При этом направления нарезки винтовых поверхностей лопаток ротора и статора противоположны (рис. 15).

Необходимо отметить, что в течение последних двух десятков лет проводятся испытания и усовершенствования так называемого *V*-насоса, созданного с использованием гелико-осевых ступеней [14; 15]. Название *V*-pump было дано насосу в 1997 г., когда стало понятно, что областью применения этих насосов являются вязкие жидкости. Данные насосы испытывались на вязких жидкостях 2000 сСт (в 1998 г.), 6000 сСт (в 2008 г.), а затем на вязкости более 13 000 сСт (в 2012 г.), и при всех вязкостях насос работал без аварий.

Пределы вязкости для *V*-насоса не установлены. В последнее время насос изготавливается как многоступенчатый габарита 7А (наружный диаметр 136 мм) для работы с двигателем серии 540, идентичным скважинной системе. В дальнейшем запланированы промысловые испытания в Венесуэле на реальной вязкой жидкости.



Рис. 15. Гелико-осевая ступень
[Figure 15. *V*-pump single-stage]

Второе уникальное преимущество *V*-насоса – стойкая работа при повышенном содержании механических примесей. С большим успехом проведены тесты на эрозию при содержании 27 % песка.

Испытания гелико-осевого насоса с частотой вращения 60 Гц на вязкой двухфазной жидкости показали, что при подаче 3180 м³/сут и вязкости жидкости 300 сП максимальная величина газо-содержания достигла 42 % без срыва подачи.

В СССР гелико-осевой насос или насосы идентичной конструкции тоже подвергались различным исследованиям с целью их эффективного использования, главным образом в химической промышленности.

В 1950-е и 1960-е гг. во Всесоюзном институте гидромашиностроения пришли к конструкции гелико-осевого насоса, исходя из лабиринтного уплотнения (импеллера), заменившего сальники, так насосы получили название лабиринтных [16].

По причине высоких напоров лабиринтных импеллеров, их конструктивной простоты и отсутствия механического трения между их основными деталями оказалось целесообразным использовать принцип работы лабиринтных импеллеров в насосах на малые подачи и высокие напоры. Лабиринтный насос был запатентован в 1960 г., заявка подана в 1958 г. В описании изобретения указано, что известные (до 1958 г.) так называемые лабиринтные насосы выполнены в виде вращающегося во втулке с гладкими стенками многозаходного винта (другое название этого насоса – винтовой).

В американском докладе [14], по-видимому, ошибочно, сообщается о том, что самые ранние упоминания о гелико-осевом насосе (для орошения) встречаются около 800 г. до н. э.; древние ассирийцы, Архимед, Десгофф, Палм и Кэмерон, способствовали достижениям этого насоса, используемого для перекачки. По известным нам данным, 2800 лет тому назад великим изобретателем Архимедом для орошения был использован винтовой насос, представляющий собой ротор с лопатками, установленный внутри гладкой цилиндрической поверхности корпуса.

Исследователь данных насосов А.И. Голубев [16] отмечает, что в отечественной и зарубежной литературе для подобных устройств используют различные названия: лабиринтный, лабиринтно-вихревой, лабиринтно-винтовой, дунарезной и др. По его мнению, наиболее точным является термин «лабиринтно-винтовой».

В погружных лопастных насосах для добычи нефти гелико-осевые ступени начали применяться в 1980 г. в узлах диспергаторов (рис. 15).

По результатам лабораторных исследований в ОКБ БН они были выбраны из большого количества ступеней различных конструкций как наиболее эффективные для диспергации газожидкостной смеси.

Промысловые испытания насосов в белорусском месторождении показали эффективную работу насосов с этими диспергаторами до газосодержания, достигающего 62 %. В настоящее время гелико-осевые ступени довольно широко используются во многих узлах оборудования АО «Новомет» для добычи нефти [17].

Следует подчеркнуть, что конструкция гелико-осевых ступеней, использованных в насосах для откачки ВВН [14], отличается от конструкции этих ступеней, применяемых в диспергаторах, газостабилизаторах и т. д. Дело в том, что ротор и статор *V*-насоса взаимодействуют гидравлически уникальным способом, образуя «жидкое уплотнение» между наконечником лопатки ротора и наконечником лопатки статора. Это «жидкое уплотнение» является основополагающим для исключительных характеристик насоса [14]. «Жидкое уплотнение» намного сложнее и было предметом обширного CFD-моделирования для оптимизации гидравлического поведения, конструкции наконечника лопаток и других важных аспектов насоса. Кроме работ по CFD-моделированию, естественно, необходим большой объем экспериментальных работ по усовершенствованию конструкции гелико-осевых ступеней.

Заключение

Высокий ресурсный потенциал месторождений высоковязкой нефти обуславливает большое внимание нефтяных компаний к их разработке.

Разработки залежей ВВН требуют применения специфической техники и технологий.

Наиболее подходящим оборудованием для добычи ВВН являются установки с объемными насосами. В этой связи важно определение целесообразной области применения при добыче ВВН серийных УЭЛН и перспективных УЭЛН с учетом возможных конструктивных изменений.

Эффективное применение серийных насосов при откачке ВВН значительно зависит от их производительности: чем выше производительность насоса, тем выше допустимая вязкость перекачиваемой жидкости.

Экспериментально определено, что, кроме установленных двух факторов, изменяющих ха-

рактеристики центробежного насоса при повышении вязкости перекачиваемой жидкости, а именно – гидравлических потерь трения и механических потерь дискового трения, фактически имеется третий фактор – изменение теоретического напора ступени, приводящее к дополнительным гидравлическим потерям вихреобразования в межлопаточных каналах, главным образом направляющего аппарата.

При применении серийных или перспективных УЭЛН для откачки ВВН эффективны использование специализированных программ подбора, регулирование частоты вращения ротора УЭЛН и температуры жидкости в НКТ, автоматизация всего процесса добычи нефти.

Возможны следующие конструктивные изменения УЭЛН при добыче ВВН с целью повышения их эффективности по сравнению с серийными:

- ступени с укороченной проточной частью;
- ступени с открытыми рабочими колесами, с максимально возможным уменьшением дисков колеса;
- насосы с повышенными частотами вращения;
- гелико-осевые насосы.

Список литературы

1. *Требин Г.Ф., Чарыгин Н.В., Обухова Т.М.* Нефти месторождений Советского Союза: справочник. М.: Недра, 1980, 584 с.
2. *Халитов Э.М., Климушкин И.М., Фердман Л.И.* Геология месторождений высоковязких нефтей СССР: справочное пособие. М.: Недра, 1987.
3. *Ляпков П.Д.* О влиянии вязкости жидкости на характеристику погружных насосов // Тр. ВНИИ. Вып. 41. М.: Недра, 1964. С. 100–103.
4. *Ляпков П.Д.* Пересчет характеристик погружных центробежных насосов с воды на жидкость другой вязкости // Погружные насосы для народного хозяйства / Центральное бюро технической информации. М., 1962. С. 52–74.
5. *Дроздов А.Н.* Технология и техника добычи нефти погружными насосами в осложненных условиях. М.: Макс-Пресс, 2008. С. 28–30.
6. *Гринштейн Н.Е.* Центробежные насосы с открытыми рабочими колесами для эксплуатации нефтяных скважин: дис. ... канд. техн. наук. М., 1965.
7. *Brunings C., Bernard J., Vasquez P. et al.* Artibial Lift Innovations in Eastern Venezuela, Bare Field: ESP Workshop. 2005. Pp. 1–8.
8. *Суханов Д.Я.* Работа лопастных насосов на вязких жидкостях. М.: Машгиз, 1952. С. 5–30.
9. *Степанов А.И.* Центробежные и осевые насосы. М., 1960.

10. Айзенштейн М.Д. Центробежные насосы для нефтяной промышленности. М., 1957. С. 160–168.

11. Руднев С.С., Матвеев И.В. Методическое пособие по курсовому проектированию насосов. М., 1971. С. 11–12.

12. Михайлов А.К., Малюшенко В.В. Лопастные насосы. М.: Машиностроение, 1977. С. 18–19.

13. Агеев Ш.Р., Дружинин Е.Ю., Григорян Е.Е. Балансовые испытания ступеней лопастных насосов для добычи нефти // Бурение и Нефть. 2016. № 7–8. С. 46–47.

14. Simpson A., Rhys-Davies J., Husman M., Youri E. Elite Multiphase Solutions. A Tough, Truly Multiphase Downhole Pump for Unconventional Wells. Society of Petroleum Engineers, 2017. Pp. 1–10.

15. Rojas M., Barrios L., Kean Wee Cheah, Harris G. Full-Scale Investigation of Gas-Handling Capabilities of

High-Flow Helicoaxial ESP Stages for Deepwater Application. Society of Petroleum Engineers, 2017. Pp. 1–11.

16. Голубев А.И. Лабиринтно-винтовые насосы и уплотнения для агрессивных сред. М.: Машиностроение, 1981. С. 4–5.

17. Каталог продукции АО «Новомет». 2018.

Для цитирования

Агеев Ш.Р., Дружинин Е.Ю., Камалетдинов Р.С. Перспективы добычи вязкой жидкости установками скважинных электроприводных лопастных насосов (УЭЛН) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 66–80. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-66-80>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-66-80

Research paper

Prospects for production of viscous fluid by electric shaft-driven vane pumps (ESP)

Sharifjan R. Ageyev, Evgeny Yu. Druzhinin, Rustam S. Kamaletdinov

JSC “Novomet Perm”, 21 Kashirskiy Passage, Moscow, 115201, Russian Federation

Article history:

Received: May 25, 2020

Revised: May 31, 2020

Accepted: June 1, 2020

Keywords:

ESP, oil production, high RPM, high viscosity, efficiency, open impeller, blading section, velocity triangle-pump, oil-well tubing

The article deals with the prospects of developing significant world reserves of high-viscosity oil. Its production requires specific equipment and technologies, selection of efficient equipment, as well as a special approach in its operation. At the same time it is necessary to take into account the influence of high viscosity on the main characteristics of pumps and on the operating conditions of the equipment in the well. The reasons for unstable operation of the ESP at start-up after long stops are described. The methods of recalculation of characteristics of pumps for oil production of common design are offered. Some results of researches of such pumps on viscous liquid and recommendations on calculation of a flowing part are provided. The possibilities of pumps with open impeller stages and with increased shaft speeds are determined. Additional reasons for decreasing the characteristics of the pump on the viscous fluid, results of the test of stage assembly with measurement of average circumferential components of flow rates at different viscosity of the pumped fluid are given. The possibility of using helico-axial pumps is also considered. Application of modern programs and methods of equipment selection and operation, ESP rotor speed regulation, liquid temperature regulation in tubing and automation of the whole oil production process is recommended. Possible design changes of the ESP in the process of tubing production for the purpose of increasing their efficiency in comparison with the serial pumps are specified. The article can be useful for specialists in design, selection and operation of equipment for high-viscosity oil production.

References

1. Trebin GF, Charygin NV, Obukhova TM. *Nefti mestorozhdenii Sovetskogo soyuza [Oilfields of Soviet Union]: handbook*. Moscow: Nedra Publ.; 1980. (In Russ.)

Sharifjan R. Ageyev, Head of the Department of Applied Hydrodynamics at the Experimental Design Bureau of JSC “Novomet-Perm”.

Evgeny Yu. Druzhinin, Head of Sector of Hydrodynamics of JSC “Novomet-Perm”.

Rustam S. Kamaletdinov, Deputy Director of the Department of Innovative Developments of JSC “Novomet-Perm”, PhD, Rustam.Kamaletdinov@novometgroup.com

2. Khalitov EM, Klimushkin IM, Ferdman LI. *Geologiya mestorozhdenii vysokovязkikh neftei SSSR [Geology of the Soviet Union high-viscosity oilfields]: reference manual*. Moscow: Nedra Publ.; 1987. (In Russ.)

3. Lyapkov PD. O vliyaniy vyazkosti zhidkosti na kharakteristiku pogruznykh nasosov [On the influence of fluid viscosity on the characteristics of submersible pumps]. *Trudy VNI [Proceedings of VNI]*. 1964;(41):100–103. (In Russ.)

4. Lyapkov PD. Pereschet kharakteristik pogruznykh tsentrobezhnykh nasosov s vody na zhidkost' drugoi vyazkosti [Recalculation of the characteristics of the submersible centrifugal pumps from water to a liquid of other viscosity]. *Pogruznyye nasosy dlya narodnogo khozyaistva [Submersible pumps for the national economy]*. Moscow; 1962. p. 52–74. (In Russ.)
5. Drozdov AN. *Tekhnologiya i tekhnika dobychi nefi pogruznyimi nasosami v oslozhnennykh usloviyakh [Technology and technology of oil extraction by the submersible pumps in the complicated conditions]*. Moscow: Max-Press; 2008. p. 28–30. (In Russ.)
6. Greenstein NE. *Tsentrobezhnye nasosy s otkrytymi rabochimi kolesami dlya ekspluatatsii nefyanykh skvazhin [Centrifugal pumps with the open impellers for operation of the oil wells]*: Cand. of Sci. (Techn.) Dissertation. Moscow; 1965. (In Russ.)
7. Brunings C, Bernard J, Vasquez P, et al. *Artibial Lift Innovations in Eastern Venezuela, Bare Field: ESP Workshop*. 2005. p. 1–8.
8. Sukhanov DYa. *Rabota lopastnykh nasosov na vyazkikh zhidkostyakh [Operation of vane pumps on viscous liquids]*. Moscow: Mashgiz Publ.; 1952. p. 5–30. (In Russ.)
9. Stepanov AI. *Tsentrobezhnye i osevye nasosy [Centrifugal and axial pumps]*. Moscow; 1960. (In Russ.)
10. Eisenstein MD. *Tsentrobezhnye nasosy dlya nefyanoi promyshlennosti [Centrifugal pumps for oil industry]*. Moscow; 1957. p. 160–168. (In Russ.)
11. Rudnev SS, Matveev IV. *Metodicheskoe posobie po kursovomu proektirovaniyu nasosov [Methodical manual for the course design of the pumps]*. Moscow; 1971. p. 11–12. (In Russ.)
12. Mikhailov AK, Malyushenko VV. *Lopastnye nasosy [Blade pumps]*. Moscow: Mashinostroenie; 1977. p. 18–19. (In Russ.)
13. Ageev SR, Druzhinin EYu, Grigoryan EE. *Balansovye ispytaniya stupenei lopastnykh nasosov dlya dobychi nefi [Balance tests of the vane pump stages]. Burenie i Neft [Drilling and Oil]*. 2016;(7–8):46–47. (In Russ.)
14. Simpson A, Rhys-Davies J, Husman M, Youri E. *Elite Multiphase Solutions. A Tough, Truly Multiphase Downhole Pump for Unconventional Wells*. Society of Petroleum Engineers; 2017. p. 1–10.
15. Rojas M, Barrios L, Kean Wee Cheah, Harris G. *Full-Scale Investigation of Gas-Handling Capabilities of High-Flow Helicoaxial ESP Stages for Deepwater Application*. Society of Petroleum Engineers; 2017. p. 1–11.
16. Golubev AI. *Labirintno-vintovye nasosy i uplotneniya dlya agressivnykh sred [Labyrinth screw pumps and seals for aggressive media]*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1981. p. 4–5. (In Russ.)
17. Product catalog of JSC “Novomet”. 2018. (In Russ.)

For citation

Ageyev ShR, Druzhinin EYu, Kamaletdinov RS. Prospects for production of viscous fluid by electric shaft-driven vane pumps (ESP). *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):66–80. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-66-80> (In Russ.)



СТРОИТЕЛЬСТВО CIVIL ENGINEERING (CONSTRUCTION)

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-81-93

УДК 624.012:691.714:624.014

Научный обзор

Обзор высокопрочной винтовой арматуры, применяемой в предварительно напряженных конструкциях

Г.Е. Гришин

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона имени А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»», Российская Федерация, 109428, Москва, 2-я Институтская ул., д. 6, корп. 5

Г.И. Тихонов

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона имени А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»», Российская Федерация, 109428, Москва, 2-я Институтская ул., д. 6, корп. 5
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Г.Э. Окольников

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 13 апреля 2020 г.

Доработана: 1 июня 2020 г.

Принята к публикации: 2 июня 2020 г.

Ключевые слова:

винтовая арматура, прочность на растяжение, гидравлический домкрат, анкер, муфта

В статье делается обзор мировых и отечественных образцов винтового высокопрочного арматурного проката для предварительного напряжения в бетонных конструкциях. В первую очередь анализируются их технические характеристики, влияющие на скорость монтажа зданий и сооружений, а также на металлоемкость применяемых в них железобетонных конструкций. Рассматриваются индивидуальные особенности профиля арматурных прокатов, присущих отдельным странам, с последующей оценкой их поведения в железобетонных конструкциях. Особое внимание уделяется отечественным разработкам в этом направлении для оценки конкурентоспособности инновационных профилей как внутри России, так и на мировом рынке. Одной из самых главных разработок за последние годы в нашей стране является арматура класса Av1000П, история появления которой описана во второй части обзора. Причиной создания данного профиля стали значительные проблемы, связанные с трещиностойкостью, распорностью и выносливостью предшествующих видов винтового и периодического профилей высокопрочного арматурного проката. Помимо арматурных профилей частично изучен скоростной способ стыковки и анкеровки при помощи муфтовых резьбовых соединений, возможный только на арматуре винтового профиля без трудоемкого нарезания резьбы на стержни.

Введение

Сейчас в мировой практике и в том числе в Российской Федерации с каждым годом возрас-

тают объемы применения железобетона (мостостроение, АЭС, специальные сооружения, гражданское и промышленное строительство). И часто главной задачей для использования строительных материалов является не их цена, а их безопасность и сохранение значительных эксплуатационных свойств на протяжении всей жизни зданий и сооружений.

В мировой практике строительства уже давно известно, что на каждый доллар, вложенный в повышение эксплуатационных свойств и долговечности, приходится сто долларов отдачи, сэкономленных на эксплуатационные затраты.

Гришин Григорий Евгеньевич, аспирант, инженер-конструктор Проектно-конструкторского центра № 25 НИИЖБ имени А.А. Гвоздева, eLIBRARY SPIN-код: 8317-3139, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4646-7514>

Тихонов Георгий Игоревич, аспирант департамента строительства Инженерной академии РУДН, инженер-конструктор Проектно-конструкторского центра № 25 НИИЖБ имени А.А. Гвоздева, eLIBRARY SPIN-код: 5043-3130, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7010-4118>

Окольникова Галина Эриковна, доцент департамента строительства Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук, доцент, eLIBRARY SPIN-код: 8731-8713, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8143-4614>, okolnikova@rudn.ru

© Гришин Г.Е., Тихонов Г.И., Окольникова Г.Э., 2020

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



Арматурные работы по сравнению с опалубочными и бетонными являются наиболее трудоемкими и продолжительными и занимают основную долю в сметах на стоимость возведения сооружений [1].

Механические и особенно муфтовые резьбовые соединения позволяют значительно сократить трудоемкость, металлоемкость и сроки возведения металлических каркасов. Их реализация возможна на базе применения винтовой арматуры [2].

Во многих специальных, мостовых сооружениях, зданиях атомной энергетики и в сооружениях, находящихся в зонах повышенной сейсмоопасности, для повышения их надежности, эксплуатационных свойств, безопасности, уменьшения материалоемкости и трудозатрат применяют предварительно напряженную высокопрочную винтовую арматуру [3], о которой и пойдет речь в данном обзоре.

1. Мировой опыт в производстве высокопрочного винтового арматурного профиля

1.1. Европейская высокопрочная арматура на примере винтового профиля DYWIDAG

Пионерами на рынке винтового арматурного проката в конце 1960-х годов выступила строи-

тельная компания DYWIDAG. Впервые данная арматура была произведена в Германии на металлургическом заводе Peine-Salzqiter. Среди различных арматурных прокаток был создан и высокопрочный класс арматуры Gr1080/1230 и Gr835/1030 диаметром 16–50 мм, предназначенный для использования в предварительно напряженных железобетонных конструкциях (рис. 1) [4].



Рис. 1. Винтовой профиль DYWIDAG
[Figure 1. Thread bar DYWIDAG]

Арматурный прокат производится до сих пор и распространен по всему миру, особенно в европейских странах, Америке и Канаде.

Таблица 1

Физико-механические показатели винтовой арматуры DYWIDAG
[Table 1. Physico-mechanical properties of DYWIDAG thread bar]

Наименование [Designation]	Винтовая арматура [Thread bar]					
	18 WR	26 WR	32 WR	36 WR	40 WR	47 WR
Номинальный диаметр d_s , мм [Nominal diameter d_s , mm]	17,5	26,5	32	36	40	47
Площадь поперечного сечения S_n , мм ² [Cross section area S_n , mm ²]	241	552	804	1,018	1,257	1,735
Масса на погонный метр ¹ M , кг/м [Nominal mass per metre ¹ M , kg/m]	1,96	4,48	6,53	8,27	10,20	14,10
Шаг резьбы c , мм [Pitch c , mm]	8	13	16	18	20	21
Значение разрушающей нагрузки F_m , кН [Characteristic of breaking load F_m , kN]	255	580	845	1,070	1,320	1,820
Максимальные начальные значения преднапряжения ² $P_{m0,max} = S_n \times 0,8 \times f_{p,k}$, кН [Maximum initial stressing force ² $P_{m0,max} = S_n \times 0,8 \times f_{p,k}$, kN]	204	464	676	856	1,056	1,457
Максимальные значения перенапрягающих усилий ³ $P_{0,max} = S_n \times 0,95 \times f_{p0,1k}$, кН [Maximum overstressing force ³ $P_{0,max} = S_n \times 0,95 \times f_{p0,1k}$, kN]	219	499	722	912	1,131	1,566

Примечание: 1 – номинальная масса на метр включает в себя 3,5 % не несущих нагрузки ребер; 2 – приведенные значения являются максимальными значениями в соответствии с Еврокодом 2; 3 – перенапряжение допускается, если сила в домкрате для предварительного напряжения может быть измерена с точностью, равной 5 % от конечного значения силы предварительного напряжения.

[Note: 1 – the nominal mass per metre includes 3.5% not load bearing portion of ribs; 2 – the given values are maximum values according to Eurocode 2; 3 – overstressing is permitted if the force in the prestressing jack can be measured to an accuracy of 5% of the final value of the prestressing force.]

Данный арматурный прокат имеет следующие технические характеристики (табл. 1): стержни предназначены для предварительного напряжения, горячекатаные, с круглым поперечным сечением и лысками по бокам. Натягиваются способом натяжения на упоры при помощи гидравлических домкратов. Изготовлены из стали Y 1050 H согласно рEN 10138-4 [4].

Винтовая арматура выпускается длиной прокатки до 18 м и может быть разрезана на заданные длины перед отправкой на рабочую площадку. Варианты диаметров – 17,5, 26,5, 32, 36, 40 и 47 мм. Имеет непрерывные горячекатаные ребра, обеспечивающие правостороннюю резьбу по всей длине. Может быть разрезана в любом месте и навинчиваться без дополнительной подготовки. Маркируется по номинальному диаметру и WR, например 26 WR.

Стержни имеют номинальную прочность на растяжение $R_s = 1050, 930$ и 835 Н/мм^2 в соответствии с классом проката.

1.2. Китайская высокопрочная арматура на примере винтового профиля от компаний Yidao и OVM

В связи с активным экономическим ростом в Китае в 2011 году китайские компании переняли опыт европейских металлургов и также начали производить высокопрочную арматуру винтового профиля для предварительного напряжения. Арматура производится в соответствии с требованиями китайских норм и активно используется в массовом строительстве китайской инфраструктуры (рис. 2).

Технические характеристики (табл. 2) [5]: сделана по стандарту GB/T 20065-2016. Предел текучести 1080 МПа. Предел прочности 1230 МПа. Состав: 40Si2MnV. Доступные диаметры – 25, 32, 36, 40, 50 мм. Арматура предназначена для натяжения на бетон. Класс – PSB1080. Длина прокатки 9 и 12 м.

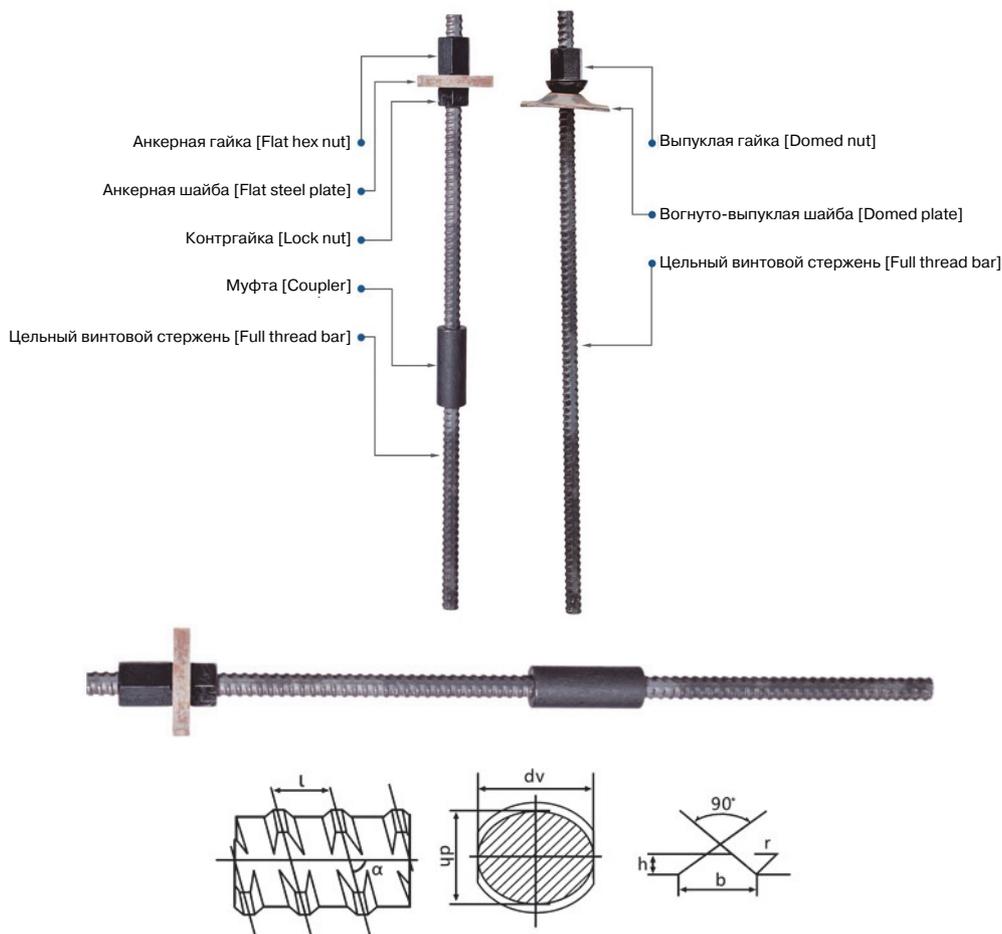


Рис. 2. Арматура винтового профиля фирмы Yidao
 [Figure 2. Thread bar Yidao]

Таблица 2

Физико-механические показатели винтовой арматуры Yidao
 [Table 2. Physico-mechanical properties of Yidao thread bar]

Диаметр [Diameter]	Площадь поперечного сечения [Cross-sectional area]	Вес погонного метра [Weight]	PSB 1080			
			Минимальный предел текучести [Minimum yield stress]		Минимальный предел прочности [Minimum ultimate stress]	
мм [mm]	мм ² [mm ²]	кг/м [kg/m]	МПа [MPa]	кН [kN]	МПа [MPa]	кН [kN]
15	177	1,4	1080	191	1230	218
20	314	2,47	1080	339	1230	386
25	491	4,1	1080	530	1230	604
32	804	6,65	1080	868	1230	989
36	1018	8,41	1080	1099	1230	1252
40	1257	10,34	1180	1358	1230	1546
50	1963	16,28	1080	2120	1230	2414
Удлинение при разрушении A, % [Elongation at fracture A, %]					≥ 6	
Полное удлинение при максимальной нагрузке Agt, % [Total elongation at max force Agt, %]					≥ 3,5	
Релаксация после 1000 часов, % [Relaxation at 1000 h, %]					≤ 4	
Модуль упругости, МПа [Modulus of elasticity, MPa]					2×10 ⁵	

Предназначена для строительства шоссе, мостов, железобетонных анкерных систем, опалубочных панелей, промышленных зданий, гидротехнических сооружений, зданий из сборного железобетона.

Горячекатаная с правой резьбой.

Для анкеровки применяются гайка, плоская стальная пластина, контргайка, резьбовая муфта, выпуклая гайка, пластина под выпуклую гайку и гидравлический домкрат.

1.3. Японская высокопрочная винтовая арматура фирмы Sumitomo

Япония, как и многие другие страны, перенимала европейский опыт в создании винто-

го арматурного проката (рис. 3). Но в профилях японского образца появились несколько отличий, таких как отсутствие боковой лычки или вовсе ее замена на желоба, чтобы убрать концентрации напряжений и снизить вес погонного метра арматурного проката. Также изменен угол винтовых ребер по отношению к оси стержней для уменьшения шага ребер и увеличения сцепления с бетоном, которое сильно влияет на работу предварительно напряженной арматуры в бетоне.

Технические характеристики арматуры приведены в табл. 3 [6].

Таблица 3

Физико-механические показатели винтовой арматуры Sumitomo

Обозначение	Предел текучести, Н/мм ²	Предел прочности на растяжение, Н/мм ²	Удлинение, %	Релаксация, %	Погонная масса, кг/м	Номинальный диаметр		Измерения винтовой области				
						dh, мм	dv, мм	Высота a, мм	Ширина b, мм	Шаг c, мм	Угол α°	
23 мм	930	1080	6,0	4,0	3,42	23,0	23,0	1,40	5,5	12,0	81,0	
	930	1180										
26 мм	930	1080				4,38	26,0	26,0	1,70	6,5		12,7
	930	1180										
32 мм	930	1080				6,63	32,0	32,0	2,00	7,0		17,0
	930	1180										
36 мм	930	1080	8,27	36,0	36,0	2,18	8,6	18,0				

Table 3

Physico-mechanical properties of Sumitomo thread bar

Designation	Yield strength, N/mm ²	Tensile strength N/mm ²	Elongation, %	Relaxation, %	Weight, kg/m	Nominal diameter		Measurement of thread area			
						dh, mm	dv, mm	Height a, mm	Width b, mm	Pitch c, mm	Angle α, °
23 mm	930	1080	6.0	4.0	3.42	23.0	23.0	1.40	5.5	12.0	81.0
	930	1180									
26 mm	930	1080									
	930	1180									
32 mm	930	1080									
	930	1180									
36 mm	930	1080			8.27	36.0	36.0	2.18	8.6	18.0	

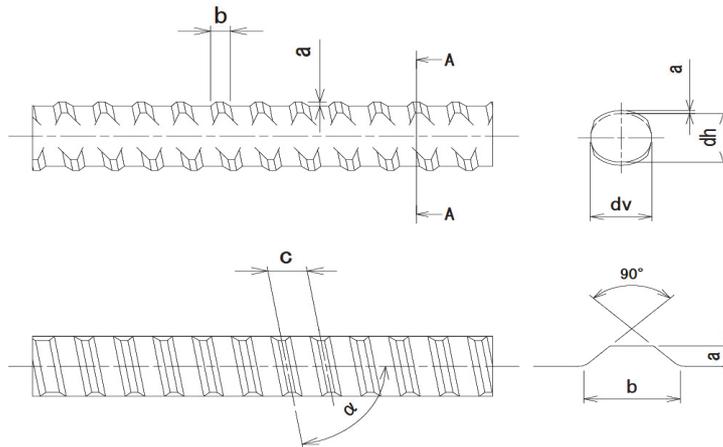
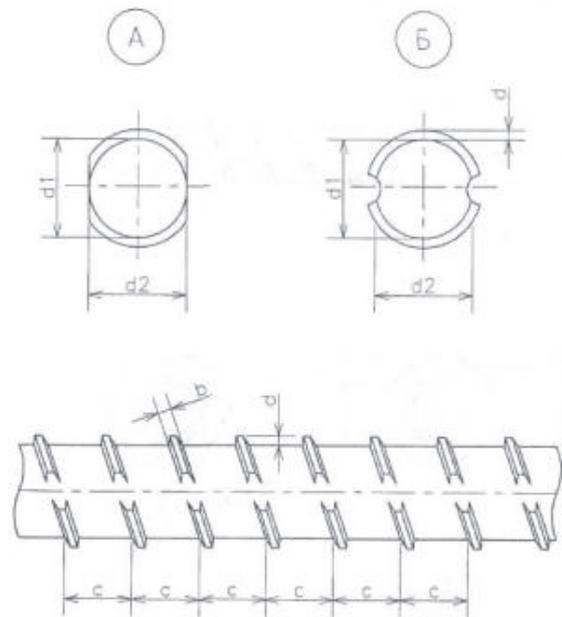


Рис. 3. Арматура винтового профиля фирмы Sumitomo
[Figure 3. Thread bar Sumitomo]

2. Отечественный арматурный винтовой прокат и новый вид арматуры класса Аv1000П

С конца 1970-х годов в СССР делались попытки воссоздания и освоения производства винтовой арматуры на приведенных ниже предприятиях [7]:

- Донецкий металлопрокатный завод, класс арматуры № 25, А-III;
- Макеевский меткомбинат, классы арматуры № 25 и 32, А-III и Ат-V;
- Криворожский меткомбинат, классы арматуры № 18, 25 и 32, А-III и Ат-V;
- Западно-Сибирский меткомбинат, классы арматуры № 14, 16, 18, 20 и 25, А-III, А500С, Ат-V, Ат-VII, а также № 36 класса А500С;
- Череповецкий меткомбинат, класс арматуры № 36 А-V (23Х2Г2Т).

В данное время винтовой профиль арматурного проката могут воспроизвести лишь Запсибметкомбинат, Белорусский металлургический завод и Тульский МПЗ [7; 8].

Несмотря на то что технология создания винтового профиля по сравнению с традиционными профилями приводит к удорожанию стоимости арматурных стержней, это не мешает винтовому прокату массово внедряться в железобетонные конструкции по всему миру. В первую очередь это связано с тем, что арматура, как правило, стыкуется в нахлестку, а значит, ведет к перерасходу арматурной стали, например в Германии на некоторых объектах при стыковке в нахлестку уходит до 50 % всей арматуры объекта [9]. А в густоармированных конструкциях стыковка бывает достаточно затруднительной и может приводить к плохой укладываемости и вибрации бетонной смеси. Есть и другие причины, мешающие внедрению винтового проката, такие как:

- удорожание прокатки стержней на заводах из-за необходимости синхронизации прокатных валов стана (рис. 4);
- чрезмерная распорность проката по двум направлениям со стороны ребер;
- наличие зарубежных патентов на уже существующие основные виды профилей винтового проката.

В РФ и странах СНГ при монолитном строительстве помимо стыковки часто используют сварочные соединения, уменьшающие длину нахлеста. Но в связи с требованиями СП 52-101-2003, увеличивающими длину нахлеста на 15–30 %, сварочные

соединения также перестают быть выгодными, поэтому применение муфтовых резьбовых соединений и развитие новых видов винтового арматурного проката наиболее актуально (рис. 5) [10].

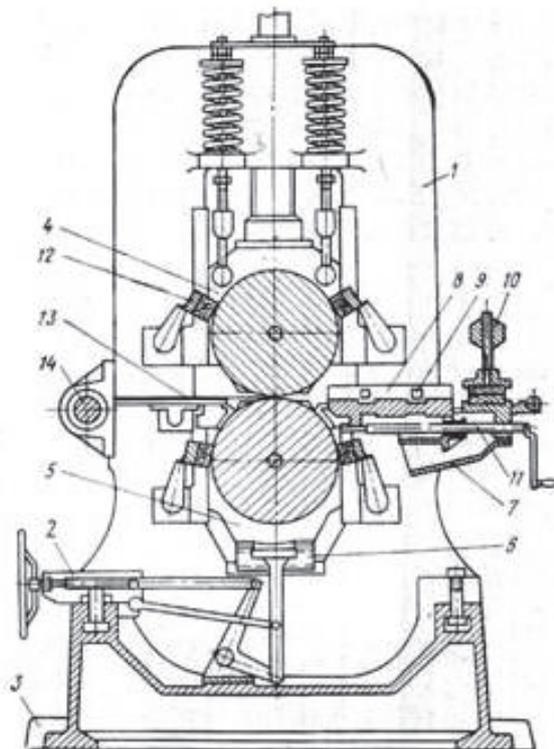


Рис. 4. Рабочая клеть двухвалкового прокатного стана
[Figure 4. Working stand of a two-roll rolling mill]

Стоит отметить, что винтовая арматура обладает большим потенциалом в качестве предварительно напряженной арматуры в железобетонных конструкциях. В технологии ее применения есть значительные преимущества благодаря применению гидравлических домкратов, вытягивающих арматуру по ходу резьбы, и упрощенной системе анкеровки арматуры в теле бетона [11].

Для предотвращения указанных недостатков в 2003–2004 годах был изобретен новый вид арматурного профиля, способный объединить сильные стороны кольцевого профиля по ГОСТу 5781-82, а именно высокие показатели критерия Рема, положительно влияющие на распорность арматуры, и серповидного, имеющего меньшее количество пересечений с поперечными ребрами, которые негативно влияли на выносимость кольцевого профиля. В итоге скрещивания был реализован серповидный четырехсторонний профиль класса А500СП [12].

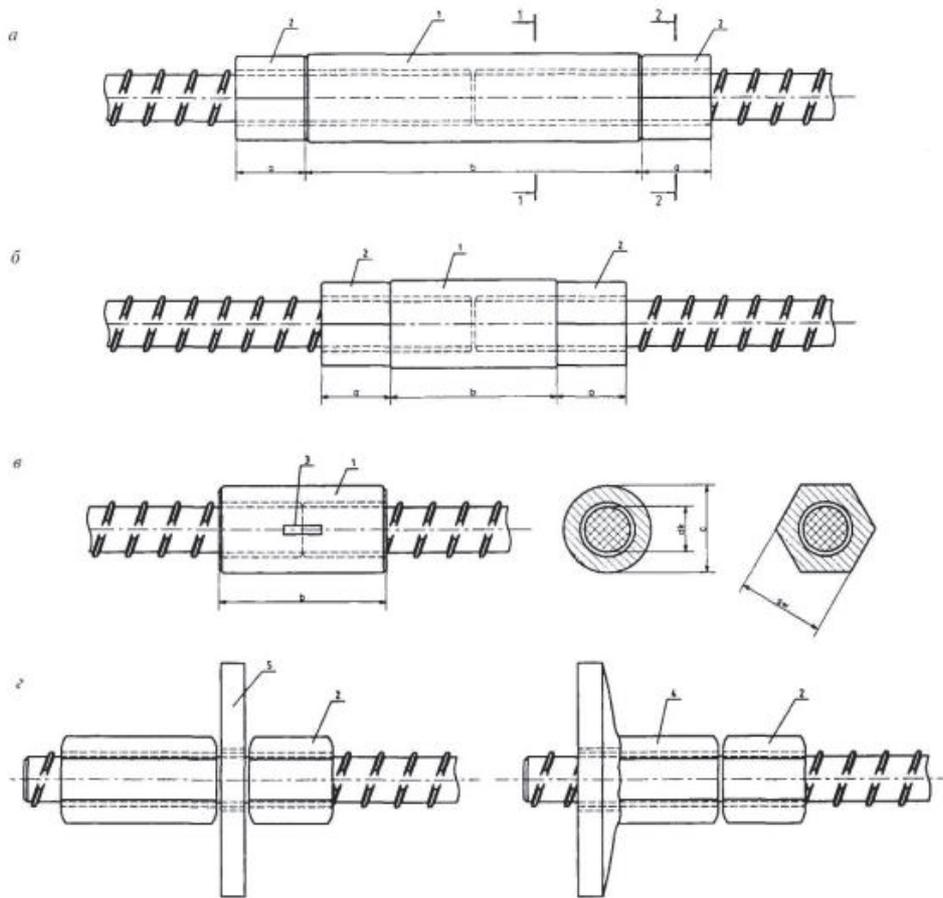


Рис. 5. Винтовая арматура с основными винтовыми соединениями [13]:

а – сжато-растянутый стык с контргайками; *б* – сжатый стык с контргайками; *в* – сжатый (контактный) стык; *г* – два вида концевых анкеров винтовой арматуры; 1 – соединительная муфта; 2 – контргайка; 3 – щель для контроля контакта стержней; 4 – анкерная гайка; 5 – анкерная шайба

[Figure 5. Thread bar with basic thread joints [13]:

a – compressed-stretched joint with lock nuts; *б* – compressed joint with lock nuts; *в* – compressed (contact) joint; *г* – two types of end anchors of thread bar; 1 – coupling; 2 – lock nut; 3 – slot for rod contact control; 4 – anchor nut; 5 – anchor plate]

При одной и той же высоте ребер получилось улучшить показатели критерия Рема даже при увеличении шага между ребрами от 10 до 15 %. Таким образом, между поперечными ребрами есть достаточное количество пространства для того, чтобы в это пространство смог попасть заполнитель из бетонной смеси, тем самым увеличивая сцепление бетона и арматуры. А четырехрядное расположение поперечных ребер исправляет проблему двухосной распорности при двухстороннем расположении серповидных ребер [14].

Для сравнения преимуществ и недостатков трех вышеупомянутых профилей (рис. 6), посредством трехбалльной оценки была составлена табл. 4

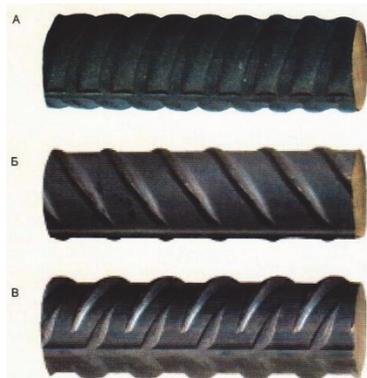


Рис. 6. Виды периодического профиля отечественного арматурного проката:

A – кольцевой; Б – двухсторонний серповидный; В – четырехсторонний серповидный

[Figure 6. Types of periodic profile of domestic rebar:

A – ring bar; Б – crescent-shaped two-way; В – crescent four-sided]

Оценка эффективности известных видов периодических профилей арматуры [13]

№ п/п	Геометрические параметры и оценочные характеристики периодического профиля стержней, определяющие высокие эксплуатационные качества арматуры (нормируемые параметры выделены жирным шрифтом)	Оптимальные уровни значений и показателей	Значения геометрических параметров и оценочных характеристик для применяемых в РФ типов арматурных профилей (число значков (+) – условно балльная оценка эксплуатационных качеств)		
			Кольцевой по ГОСТу 5781	Серповидный двухсторонний по СТО АСЧМ 7-93	Серповидный четырехсторонний по ТУ 14-1-5526
1	2	3	4	5	6
1	Относительная площадь смятия поперечных ребер f_r	0,07–0,08	фактическая 0,093–0,128 (++)	Нормируемая не менее 0,043–0,056 (++)	Нормируемая не менее 0,075–0,078 (+++)
2	Шаг поперечных ребер (с учетом допусков) t	(0,6–0,8) d_n	0,3–0,7 d_n (++)	(0,4–1,0) d_n (0,42–0,69) d_n (++)	(0,50–0,86) d_n (+++)
3	Высота поперечных ребер (для серповидных ребер – максимальная) h	$\geq 0,065 d_n$	(0,04–0,05) d_n (++)	(0,065–0,1) d_n (0,067–0,083) d_n (+++)	(0,063–0,083) d_n (+++)
4	Плавность сопряжения боковых поверхностей поперечных и продольных ребер с поверхностью сердечника (радиус сопряжения r)	Максимально возможный	1,5–3,5 мм (только для поперечных ребер) (++)	Не предусматривается и не нормируется (++)	Предусматривается, но не нормируется (+++)
5	Коэффициент охвата сердечника поперечными ребрами	(0,8–0,9) πd_n	(0,85–0,95) πd_n (+++)	(0,75–0,80) πd_n (++)	(0,85–0,95) πd_n (+++)
6	Отношение расстояния в свету между поперечными ребрами к их высоте c_r/h	≥ 8	3,12–6,5 (+)	4,72–7,10 (++)	7,12–10,75 (+++)
7	Возможность увеличения высоты поперечных ребер для достижения оптимальной площади смятия ребер f_r	Не требуется до 0,07–0,08	Не требуется (+++)	Средняя (++)	Высокая (+++)
8	Способность при минимальных нормируемых значениях f_r сохранения сцепления с бетоном при пластических деформациях арматуры за пределом текучести	–	Средняя (++)	Средняя (++)	Высокая (+++)
9	Возможность усиления сцепления с бетоном при повышении площади смятия ребер (при адекватном поперечном армировании конструкции)	Высокая	Малая (++)	Средняя (++)	Высокая (+++)
10	Способность обеспечения нормируемого уровня сопротивления динамическим, в том числе циклическим, нагрузкам	Высокая	Средняя (++)	Высокая (+++)	Высокая (+++)
11	Деформативность железобетонных изгибаемых элементов (балок, плит) при нормативной нагрузке	Низкая	Низкая (+++)	Средняя (++)	Низкая (+++)
12	Трещиностойкость железобетонных изгибаемых элементов (балок, плит) при нормативной нагрузке	Высокая	Высокая (+++)	Средняя (++)	Высокая (+++)
13	Защита от воздействия агрессивных сред (с учетом п. 12)	Высокая	Высокая (+++)	Средняя (++)	Высокая (+++)
14	Способность при минимальных нормируемых значениях f_r к обеспечению надежности и жесткости концевых анкеров (обжатых шайб) на предварительно напрягаемых арматурных стержнях с натяжением на упоры форм	Высокая	Высокая (+++)	Средняя (++)	Высокая (+++)

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6
15	Длина зоны передачи напряжений на бетон при отпуске натяжения арматуры	Малая	Малая (+++)	Средняя (++)	Малая (+++)
16	Распорность профиля на длине зоны передачи напряжений на бетон при значениях f_c : – минимальных нормируемых; – при фактических высоких и близких к оптимальным	Низкая	Высокая (+)	Низкая (+++)	Низкая (+++)
		Низкая	Высокая(+)	Средняя (++)	Низкая (+++)
17	Узнаваемость (простота идентификации) класса арматуры на стройплощадке	Высокая	Средняя (++)	Средняя (++)	Высокая (+++)
18	Технологичность в производстве	Высокая	Средняя (++)	Высокая (+++)	Высокая (+++)
	Суммарная условно балльная оценка эффективности типов периодического профиля арматурных стержней		(+)42	(+)42	(+)57

Table 4

Evaluation of the effectiveness of known types of periodic reinforcement profiles [13]

No.	Geometric parameters and evaluation characteristics of the periodic profile of rods that determine the high performance of the reinforcement (normalized parameters are highlighted in bold)	Optimal levels of values and indicators	Values of geometric parameters and evaluation characteristics for the types of reinforcement profiles used in the Russian Federation (the number of icons (+) is a conditional point rating of performance)		
			Ring bar according to GOST 5781	Crescent-shaped two-way according to STO ASCHM 7-93	Crescent four-sided according to TU 14-1-5526
1	2	3	4	5	6
1	The relative area of crushing of the transverse ribs f_r	0,07–0,08	Actual 0,093–0,128 (++)	Normalized not less 0,043–0,056 (++)	Normalized not less 0,075–0,078 (+++)
2	Step of transverse ribs (subject to tolerances) t	(0,6–0,8) d_n	0,3–0,7 d_n (++)	(0,4–1,0) d_n (0,42–0,69) d_n (++)	(0,50–0,86) d_n (+++)
3	Height of transverse ribs (maximum for crescent ribs) h	$\geq 0,065 d_n$	(0,04–0,05) d_n (++)	(0,065–0,1) d_n (0,067–0,083) d_n (+++)	(0,063–0,083) d_n (+++)
4	The smoothness of the mating of the lateral surfaces of the transverse and longitudinal ribs with the surface of the core (mating radius r)	The highest possible	1,5–3,5 mm (only for transverse ribs) (++)	Not provided and not standardized (++)	Provided and not standardized (+++)
5	The coefficient of coverage of the core transverse ribs	(0,8–0,9) πd_n	(0,85–0,95) πd_n (+++)	(0,75–0,80) πd_n (++)	(0,85–0,95) πd_n (+++)
6	The ratio of the distance in the light between the transverse ribs to their height c_r/h	≥ 8	3,12–6,5 (+)	4,72–7,10 (++)	7,12–10,75 (+++)
7	The ability to increase the height of the transverse ribs to achieve the optimal area of crushing ribs f_r	Not required up to 0,07–0,08	Not required (+++)	Medium (++)	High (+++)
8	Ability at the minimum standardized values of f_r to maintain adhesion to concrete during plastic deformation of the reinforcement beyond the yield strength	–	Medium (++)	Medium (++)	High (+++)
9	Possibility of reinforcing adhesion to concrete with increasing rib crushing area (with adequate transverse reinforcement of the structure)	High	Small (++)	Medium (++)	High (+++)

Table 4, ending

1	2	3	4	5	6
10	The ability to provide a normalized level of resistance to dynamic, including cyclic loads	High	Medium (++)	High (+++)	High (+++)
11	Deformability of reinforced concrete bending elements (beams, plates) at standard load	Low	Low (+++)	Medium (++)	Low (+++)
12	Fracture resistance of reinforced concrete bending elements (beams, plates) at standard load	High	High (+++)	Medium (++)	High (+++)
13	Protection against aggressive environments (subject to clause 12)	High	High (+++)	Medium (++)	High (+++)
14	The ability, at minimum normalized values of f_r , to ensure the reliability and rigidity of end anchors (crimped washers) on prestressed reinforcing bars with tension on the mold stops	High	High (+++)	Medium (++)	High (+++)
15	The length of the zone of stress transmission to concrete when releasing tension reinforcement	Small	Small (+++)	Medium (++)	Small (+++)
16	Profile span along the length of the zone of stress transmission to concrete at values of f_r : – minimum normalized; – at actual high and close to optimal	Low Low	High (+) High(+)	Low (+++) Medium (++)	Low (+++) Low (+++)
17	Recognition (ease of identification) of the reinforcement class at the construction site	High	Medium (++)	Medium (++)	High (+++)
18	Manufacturability	High	Medium (++)	High (+++)	High (+++)
The total conditionally point assessment of the effectiveness of the types of periodic profile of reinforcing bars			(+)42	(+)42	(+)57



Рис. 7. Испытания винтовой арматуры Av500П
[Figure 7. Testing thread bar Av500P]

По многим показателям четырехсторонний серповидный профиль явно выигрывает. Поэтому на основе арматурного проката А500СП были сделаны опытные прокатки винтового четырехсто-

ронного серповидного профиля Av500П и Av1000П, уже вовсе не имеющего продольных ребер, тем самым потенциально увеличивая прочность на выносливость железобетонной конструкции. Сейчас

в НИИЖБ имени А.А. Гвоздева проводятся его испытания для определения физико-механических характеристик и обнаружения того, как он ведет себя в муфтовых соединениях и внутри железобетонных конструкций (рис. 7) [15].

Заключение

Рассмотрены основные профили винтового арматурного проката в России и за рубежом. Изучены их технические характеристики и механические свойства, на основе которых можно сделать вывод о том, что развитие винтового арматурного проката и муфтовых соединений для предварительного напряжения наблюдается во многих ведущих государствах, как с некоторыми различиями в производстве арматуры для удовлетворения стандартов металлопроката своей страны, так и с изменениями, касающимися винтового профиля в целом, значительно меняющими его физико-механические характеристики и поведение внутри предварительно напряженных конструкций.

Для отечественного рынка наибольший интерес представляет винтовая арматура с четырехрядным серповидным профилем класса Аv1000П – уникальная российская разработка, способная после прохождения всех испытаний и внесения в нормативные документы не только заменить более дорогой импортный арматурный прокат, но и попасть на экспортный рынок. Подобные разработки необходимы в первую очередь для скоростного строительства мостов, зданий атомной энергетики, строительства в сейсмоопасных районах и т. д., поскольку они сокращают сроки строительства за счет быстрой стыковки стержней муфтами и уменьшают металлоемкость железобетонных конструкций за счет отсутствия в таких конструкциях нахлестов. Данный профиль также позволяет делать предварительное напряжение на значительно более длинных участках железобетонных конструкций, не завися от длины поставляемых стержней и дополнительно упрощая монтаж.

Благодарности

Статья написана при поддержке НИИЖБ имени А.А. Гвоздева.

Участие авторов

Г.Е. Гришин – сбор и обработка материалов, написание текста. Г.И. Тихонов – сбор и обработка материалов. Г.Э. Окольников – проверка и обработка материалов.

Список литературы

1. Алиев Ш.А. Совместная работа бетона и стержневой арматуры периодического профиля. Баку, 1964. 175 с.
2. Bompa V., Elghazouli A.Y. Monotonic and cyclic performance of threaded reinforcement splices // Structures. 2018. Vol. 16. Pp. 358–372.
3. Xingu Zhonga, Tianyu Zhanga, Chao Zhaoa, Xiaojuan Shua, Mingyan Shena, Yohchia Frank Chenbc. New non-destructive dynamic tensile testing of prestressing fine-rolled screw-threaded steel bars // Engineering Structures. 2019. Vol. 182. Pp. 153–163.
4. Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1–1. General rules and rules for buildings. EN 1992-1-1. 2004, December. 225 p.
5. National standard of the People's Republic of China. 2017, September 1. 121 p.
6. Steel bars for prestressed concrete / Japanese Standards Association. 1994, June 1. 55 p.
7. Тихонов И.Н. Армирование элементов монолитных железобетонных зданий: пособие по проектированию. М., 2007.
8. Мулин Н.М., Коневский В.П., Судаков Г.Н. Новые типы профиля для стержней арматуры // Эффективные виды арматуры для железобетонных конструкций: сб. трудов НИИЖБ. М., 1970. С. 16–45.
9. Katzer J., Szatkiewicz T. Properties of concrete elements with 3-D printed formworks which substitute steel reinforcement // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 210. Pp. 157–161.
10. Дегтярев В.В. Требования отечественных и зарубежных норм к анкеровке и соединениям внахлестку без сварки стержневой арматуры периодического профиля // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: материалы 1-й Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона: в 3 кн. Кн. 2. М., 2001. С. 941–954.
11. Жунусов Г.Ж., Дмитриев С.А., Мулин Н.М. Анкеровка в бетоне горячекатаной арматуры периодического профиля крупного диаметра // Исследование прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных конструкций: сб. тр. НИИЖБ. Вып. 26. М.: Госстройиздат, 1982.
12. ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2009.
13. Тихонов Г.И. Исследование эффективности применения арматуры с новым четырехсторонним периодическим профилем в железобетонных конструкциях. М., 2019.
14. Кольнер В.М., Алиев Ш.А., Гольдфайн Б.С. Сцепление с бетоном и прочность заделки стержней арматуры периодического профиля // Бетон и железобетон. 1965. № 11. С. 15–19.
15. Тихонов И.Н. Разработка, производство и внедрение инновационных видов арматурного проката для строительства // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 67–75.

Для цитирования

Гришин Г.Е., Тихонов Г.И., Окольникова Г.Э. Обзор высокопрочной винтовой арматуры, применяемой в предварительно напряженных конструкциях // Вест-

ник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 81–93. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-81-93>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-81-93

Review paper

Overview of high-strength screw thread reinforcement used in pre-stressed structures

Grigorii E. Grishin

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev of JSC Research Center of Construction, 6 2-ya Institutskaya St, bldg. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Georgy I. Tikhonov

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev of JSC Research Center of Construction, 6 2-ya Institutskaya St, bldg. 5, Moscow, 109428, Russian Federation
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Galina E. Okolnikova

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

Article history:

Received: April 13, 2020

Revised: June 1, 2020

Accepted: June 2, 2020

Keywords:

thread bar, tensile strength, hydraulic jack, anchor, coupling

Article provides an overview of the world and domestic samples of high-strength threaded rebar for pre-stress in concrete structures. First of all, their technical characteristics were analyzed that affect the speed of installation of buildings and structures and the metal content of reinforced concrete structures used in them. We also consider the individual characteristics of the profile of rebar that are specific to individual countries, followed by an assessment of their behavior in reinforced concrete structures. Special attention is paid to domestic developments in this direction, in order to assess the competitiveness of innovative profiles both within Russia and on the world market. One of the most important developments in recent years in our country is the rebar class Av1000P, the history of which described in the second chapter of this review. The reason for the development of this profile was significant problems related to the crack resistance, thrust and endurance of previous types of thread and periodic profiles of high-strength rebar products. In addition to the reinforcement profiles, a high-speed method of joining and anchoring with the help of coupling threaded connections was partially considered, which is only possible on a screw profile armature without labor-intensive threading on rods.

Acknowledges

The article was written with the support of Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev.

Contribution of authors

Grigorii E. Grishin – collection and processing of materials, writing a text. Georgy I. Tikhonov – collection and processing of materials. Galina E. Okolnikova – verification and processing of materials.

References

1. Aliyev ShA. *Sovmestnaya rabota betona i sterzhnevoi armatury periodicheskogo profilya* [Joint work of concrete and rod reinforcement of periodic profile]. Baku; 1964. (In Russ.)

Grigorii E. Grishin, postgraduate student, design engineer of Design Center No. 25 of NIIZHB named after A.A. Gvozdev, eLIBRARY SPIN-code: 8317-3139, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4646-7514>

Georgy I. Tikhonov, postgraduate student of the Department of Construction of Engineering Academy of RUDN University, design engineer of Design Center No. 25 of NIIZHB named after A.A. Gvozdev, eLIBRARY SPIN-code: 5043-3130, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7010-4118>

Galina E. Okolnikova, Associate Professor of the Department of Construction of Engineering Academy of RUDN University, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, eLIBRARY SPIN-code: 8731-8713, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8143-4614>, okolnikova-ge@rudn.ru

2. Bompá V, Elghazouli AY. Monotonic and cyclic performance of threaded reinforcement splices. *Structures*. 2018;16:358–372.
3. Xingu Zhonga, Tianyu Zhanga, Chao Zhaoa, Xiaojuan Shua, Mingyan Shena, Yohchia Frank Chenbc. New non-destructive dynamic tensile testing of prestressing fine-rolled screw-threaded steel bars. *Engineering Structures*. 2019;182:153–163.
4. Eurocode 2. *Design of concrete structures. Part 1–1. General rules and rules for buildings*. EN 1992-1-1. 2004, December.
5. National standard of the People's Republic of China. 2017, September 1.
6. Japanese Standards Association. *Steel bars for prestressed concrete*. 1994, June 1.
7. Tikhonov IN. *Armirovanie elementov monolitnykh zhelezobetonnykh zdaniy [Reinforcement of elements of monolithic reinforced concrete buildings]: a manual for design*. Moscow; 2007. (In Russ.)
8. Mulin NM, Konevsky VP, Sudakov GN. Novye tipy profilya dlya sterzhnei armatury [New types of profile for rebar rods]. *Effektivnye vidy armatury dlya zhelezobetonnykh konstruksii [Effective types of reinforcement for reinforced concrete structures]*: proceedings of NIIZhB. Moscow; 1970. p. 16–45. (In Russ.)
9. Katzer J., Szatkiewicz T. Properties of concrete elements with 3-D printed formworks which substitute steel reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2019;210:157–161.
10. Degtyarev VV. Trebovaniya otechestvennykh i zarubezhnykh norm k ankerovke i soedineniyam vnaKhlestku bez svarki sterzhnevoi armatury periodicheskogo profilya [Requirements of domestic and foreign standards for anchoring and lap joints without welding rod fittings of periodic profile]. *Beton na rubezhe tret'ego tysyacheletiya [Concrete at the turn of the third millennium]*: materials of the 1st All-Russian Conference on the Problems of Concrete and Reinforced Concrete (book 2). Moscow; 2001. p. 941–954. (In Russ.)
11. Zhunusova GZh, Dmitriev SA, Mulin NM. Ankerovka v betone goryachekatanoy armatury periodicheskogo profilya krupnogo diametra [Anchoring in concrete of hot-rolled rebar of a periodic profile of a large diameter]. *Issledovanie prochnosti, zhestkosti i treshchinostoikosti zhelezobetonnykh konstruksii [Research of strength, rigidity and crack resistance of reinforced concrete structures]*: proceedings of NIIZhB (issue 26). Moscow: Gosstroyizdat Publ.; 1982. (In Russ.)
12. GOST 5781-82. *Stal goryachekatanaya dlya armirovaniya zhelezobetonnykh konstruksii. Tekhnicheskie usloviya [Hot-rolled steel for reinforced concrete structures. Technical conditions]*. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. (In Russ.)
13. Tikhonov GI. Issledovanie effektivnosti primeneniya armatury s novym chetyrekhstoronnim periodicheskim profilem v zhelezobetonnykh konstruksiyakh [Study of the effectiveness of using rebar with a new four-sided periodic profile in reinforced concrete structures]. Moscow; 2019. (In Russ.)
14. Kolner VM, Aliev ShA, Goldfein BS. Stseplenie s betonom i prochnost' zadelki sterzhnei armatury periodicheskogo profilya [Grip with concrete and strength of sealing bars of periodic profile reinforcement]. *Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]*. 1965; (11):15–19. (In Russ.)
15. Tikhonov IN. Razrabotka, proizvodstvo i vnedrenie innovatsionnykh vidov armaturnogo prokata dlya stroitelstva [Development, production and implementation of innovative types of rebar rolled products for construction]. *Stroitelnye materialy [Construction materials]*. 2019;(9):67–75. (In Russ.)

For citation

Grishin GE, Tikhonov GI, Okolnikova GE. Overview of high-strength screw thread reinforcement used in pre-stressed structures. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):81–93. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-81-93> (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-94-98

УДК 691.327:666.974

Обзорная статья

Баритосодержащие радиационно-защитные строительные материалы

Н.В. Новиков, С.В. СамченкоНациональный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26**Г.Э. Окольникова**

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 13 апреля 2020 г.

Доработана: 1 июня 2020 г.

Принята к публикации: 2 июня 2020 г.

Ключевые слова:

барит, баритовые бетоны, радиационно-защитные материалы, защита от ионизирующих излучений

Благодаря активному развитию отраслей, использующих ядерные технологии, все больший интерес вызывает создание высокоэффективных и экономически выгодных строительных материалов для защиты от опасных ионизирующих излучений. Широкое распространение в области радиационно-защитных строительных материалов получили баритосодержащие бетоны. Целями данной работы являются установление перспективности их применения на объектах атомной промышленности, а также поиск способов улучшения их технических и эксплуатационных характеристик. Для этого был проведен анализ актуальной литературы и научных исследований в области радиационно-защитных материалов и, в частности, баритосодержащих бетонов. Среди преимуществ баритосодержащих бетонов отмечают высокие радиационно-защитные свойства, экологичность, высокую плотность, экономические показатели. Из недостатков выделяют высокую подверженность усадочным деформациям и слабую устойчивость к циклическим температурным воздействиям. Добавление барита в состав бетона позволяет увеличить коэффициент линейного поглощения γ -лучей материала, а при грамотном подборе состава такой материал может обладать прочностными характеристиками равными или превосходящими характеристики бетонов стандартных составов. Баритосодержащие материалы имеют широкую область применения и могут использоваться как для производства тяжелого бетона при устройстве несущих и ограждающих конструкций, так и при создании отделочных радиационно-защитных покрытий стен и полов.

Введение

В современном мире ядерные технологии являются широко востребованными во многих от-

раслях промышленности. Наиболее активно используемой и развивающей эти технологии отраслью является ядерная энергетика. Согласно данным World Nuclear Industry Status Report, в 2018 году ядерная энергетика составляла 10,18 % от общей доли производства электроэнергии в мире, в России этот показатель составил 17,9 %. По данным на начало 2020 года количество действующих ядерных реакторов составляет 414, из них 38 на территории России. В стадии строительства находятся 49 атомных электростанций, в том числе 3 на территории России: Курская АЭС – 2, Ленинград-

Новиков Николай Владиславович, аспирант 1-го курса кафедры «Технология вяжущих веществ и бетонов» НИУ МГСУ, eLIBRARY SPIN-код: 8662-1970.
Самченко Светлана Васильевна, профессор кафедры «Технология вяжущих веществ и бетонов» НИУ МГСУ, доктор технических наук, профессор, eLIBRARY SPIN-код: 7537-7350.
Окольникова Галина Эриковна, доцент департамента строительства Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук, доцент, eLIBRARY SPIN-код: 8731-8713, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8143-4614>, okolnikova-ge@rudn.ru

© Новиков Н.В., Самченко С.В., Окольникова Г.Э., 2020

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

ская АЭС – 2, Плавающая атомная теплоэлектростанция г. Певек (Чукотский автономный округ) [1].

В соответствии с государственной программой «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» ожидается, что к 2027 году объем выработки электрической энергии атомными электростанциями, расположенными на территории России, составит не менее 221,7 млрд кВт·ч в год [2].

Однако, как известно, использование ядерных технологий требует эффективной защиты как человека, так и окружающей среды от опасных последствий. По этой причине и на фоне активного развития атомной промышленности все больший интерес вызывает создание высокоэффективных и относительно дешевых радиационно-защитных материалов.

1. Ионизирующие излучения и радиационно-защитные материалы

Существует два вида ионизирующих излучений: электромагнитные и корпускулярные. Электромагнитные ионизирующие излучения представляют собой поток фотонов с чрезвычайно малой длиной волны, к ним относятся рентгеновское излучение, γ -излучение и тормозное излучение, возникающие при прохождении через вещество сильно ускоренных заряженных частиц. Корпускулярное излучение представляет собой пучки ядерных частиц, ядер элементов или ионов. Это могут быть либо заряженные электроны, протоны и ионы, либо не имеющие заряда ядерные частицы – нейтроны. Наибольшую опасность представляют частицы и кванты, обладающие высокой проникающей способностью, а именно рентгеновское излучение, γ -излучение и быстрые нейтроны. Проникающая способность электромагнитных видов ионизирующих излучений в материале в большей степени зависит от плотности и состава этого материала. Наиболее эффективно электромагнитные ионизирующие излучения ослабляются при столкновении с элементами, обладающими высокими атомными номерами. По этой причине для защиты от рентгеновского и γ -излучений целесообразно использовать бетоны на тяжелых заполнителях, таких как барит, железная руда, лимонит, магнетит, металлический скрап и т. п. [3].

Высокая проникающая способность нейтронов обуславливается отсутствием заряда, вследствие чего они не взаимодействуют с электронами атомных оболочек и беспрепятственно проникают вглубь атомов. При столкновениях с атомами тяжелых

элементов происходит упругое отталкивание, в результате которого нейтрон практически не теряет энергии, однако при столкновении с почти равными им по массе ядрами водорода – протонами – энергия нейтрона уменьшается в среднем вдвое, передаваясь протону отдачи [4]. Исходя из этого перспективно использование в качестве искусственной добавки для радиационно-защитных бетонов компонентов, способствующих образованию кристаллов эттрингита. Эттрингит является высокосульфатной формой гидросульфоалюмината кальция $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ [5]. Перспективность его использования определяется наличием в этих кристаллах большого количества химически связанной воды, что может способствовать замедлению быстрых нейтронов.

2. Баритовые бетоны

Бетоны, содержащие в своем составе барит, получили широкое распространение в области радиационно-защитных материалов.

В качестве сырья для радиационно-защитных бетонов используется баритовая руда. В состав баритовой руды входят минерал барит BaSO_4 , кремнезем SiO_2 , оксиды железа Fe_3O_4 , оксид алюминия Al_2O_3 , оксид магния MgO и оксид кальция CaO [6].

Плотность баритовых бетонов составляет от 2,7 до 3,8 т/м³, прочность на сжатие 16–30 МПа, на растяжение не более 3 МПа [6–9].

К преимуществам, по сравнению с другими материалами для защиты от ионизирующих излучений, следует отнести тот факт, что, в отличие от свинца, барит безвреден для человеческого организма и окружающей среды [10; 11], а среди материалов, включающих элементы с большими атомными номерами, является экономически выгодным. Еще одно важное преимущество барита – отсутствие вторичных гамма-излучений высоких энергий, которые могут возникать при поглощении нейтронов ядрами атомов [12].

Среди недостатков бетонов с баритовыми наполнителями и заполнителями отмечают высокую подверженность усадочным деформациям и слабую устойчивость к циклическим температурным воздействиям, обусловленную неодинаковым по кристаллическим осям температурным расширением $dx = 19 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; $dy = 22 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; $dz = 35 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [6; 7; 12].

Использование барита в качестве наполнителя и заполнителя для тяжелых бетонов активно

исследуется учеными со всего мира. Чаще всего при исследовании баритовых бетонов предлагается частичная или полная замена кварцевого песка на баритовый в качестве мелкого заполнителя в составе бетонной смеси. При этом наблюдается прирост величины коэффициента линейного поглощения γ -лучей до 19 % [13–15], однако частичная замена кварцевого песка в объеме 40 % на баритовый позволяет добиться защиты как от γ -лучей, так и от нейтронного излучения. Что касается механических характеристик бетонов на баритовом песке, то присутствуют незначительное снижение прочности на сжатие и практически двукратное снижение прочности на изгиб, но при грамотной оптимизации состава возможно добиться показателей, равных или превосходящих показатели бетона на кварцевом песке [16]. Например, в составе с добавлением 5 % нанокремнезема прочность бетона на баритовом заполнителе на сжатие и изгиб была выше на 4 и 17 % соответственно, чем для бетонов на кварцевом песке [17]. Помимо использования барита в качестве наполнителя и заполнителя тяжелых бетонов, подтверждена эффективность сухих строительных смесей для нанесения в виде штукатурки или напольного покрытия на внутренние или наружные поверхности экранируемого помещения [18; 19].

Заключение

Баритовые бетоны нашли широкое применение в области радиационно-защитных материалов благодаря экологичности, экономическим показателям и защитным свойствам. Несмотря на очевидные недостатки, баритовые бетоны остаются перспективным материалом, востребованным на объектах активно развивающейся атомной промышленности.

Участие авторов

Н.В. Новиков – написание текста; *С.В. Самченко* – научное руководство; *Г.Э. Окольникова* – анализ материала.

Список литературы

1. *Froggatt A. et al.* World Nuclear Industry Status Report. 2019. 323 p.
2. О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Развитие атомного

энергетического комплекса»: постановление Правительства РФ от 16.03.2020 г. № 289-13 // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_348194 (дата обращения: 11.04.2020 г.).

3. *Баженов Ю.М.* Технология бетона. М.: Изд-во Ассоциации высших учебных заведений, 2002. 500 с.

4. *Лантев Г.А.* Радиационные защитные свойства металлобетонов // Предотвращение аварий зданий и сооружений. 2009. URL: <https://prevdis.ru/radiatsionnye-zashhitnye-svoystva-metallobetonov> (дата обращения: 11.04.2020 г.).

5. *Самченко С.В.* Роль этрингита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов. М.: Изд-во Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева, 2005. 154 с.

6. *Чан Ле Хонг.* Особотяжелый самоуплотняющийся бетон на баритовом заполнителе: дис. ... канд. тех. наук. М.: МГСУ, 2011. 121 с.

7. *Королев Е.В., Прошин А.П., Баженов Ю.М., Соколова Ю.А.* Радиационно-защитные и коррозионно-стойкие серые строительные материалы. М.: Палеотип, 2006. 272 с.

8. *Прошин А.П., Демьянова В.С., Калашиников Д.В.* Особо тяжелый высокопрочный бетон для защиты от радиации с использованием вторичных ресурсов: монография. Пенза: ПГАСА, 2004. 140 с.

9. *Комаровский А.Н.* Строительство ядерных установок. М.: Атомиздат, 1969. 503 с.

10. *Васильев А.А., Шангина Н.Н.* Физико-механические основы нетвердеющих минеральных дисперсий для санации металлических элементов подземных сооружений // Фундаментальные исследования. 2016. № 7–1. С. 14–18.

11. *Рабоцук Д.С.* Теоретические основы при создании высокоэффективных радиационно-защитных материалов для защиты от ионизирующих излучений // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ имени В.Г. Шухова (Белгород, 1–30 мая 2015 г.): сборник трудов. Белгород: Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, 2015. С. 340–343.

12. *Калашиников В.И., Демьянова В.С., Калашиников Д.В., Махамбетова К.Н.* Оптимизация состава особо тяжелого высокопрочного бетона для защиты от радиации // Строительные материалы. 2011. № 8. С. 25–28.

13. *Saidani Kh., Ajam L., Ben Oueddou M.* Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 95. Pp. 287–295.

14. *Akkurt I., Basyigit C., Kilincarslan S., Mavi B.* The shielding of γ -rays by concretes produced with barite // Progress in Nuclear Energy. 2005. Vol. 46. Issue 1. Pp. 1–11.

15. *Akkurt I., Akyildirim H., Mavi B., Kilincarslan S., Basyigit C.* Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies // Progress in Nuclear Energy. 2010. Vol. 52. Issue 7. Pp. 620–623.

16. *Gökçe H.S., Yalçınkaya Ç., Tuyan M.* Optimization of reactive powder concrete by means of barite aggregate for both neutrons and gamma rays // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189. Pp. 470–477.

17. *Янкович К., Станкович С.И., Стоянович М., Бойович Д., Антич Л.* Влияние нанокремнезема и типа заполнителя на свойства высокопрочного бетона // *Цемент и его применение*. 2017. № 4. С. 118–120.

18. *Черных Т.Н., Перминов А.В., Пудовиков В.Н., Крамар Л.Я.* Сухие баритосодержащие смеси для защиты от ионизирующих излучений // *Сухие строительные смеси*. 2012. № 1. С. 28–29.

19. Патент 2388715 Российская Федерация, С04В 28/30, G21F 1/04, С04В 111/20. Сухая строительная

смесь / Гончаров Ю.Д., Рыжов А.С.; заявитель и патентообладатель ООО «Альфапол». № 2008142229/03; заявл. 16.10.2008; опубл. 10.05.2010. Бюл. № 13.

Для цитирования

Новиков Н.В., Самченко С.В., Окольников Г.Э. Баритосодержащие радиационно-защитные строительные материалы // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 94–98. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-94-98>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-94-98

Review paper

Barite-containing radiation protective building materials

Nikolay V. Novikov, Svetlana V. Samchenko

National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation

Galina E. Okolnikova

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

Article history:

Received: April 13, 2020

Revised: June 1, 2020

Accepted: June 2, 2020

Keywords:

barite, barite concrete, radiation protective materials, protection against ionizing radiation

Due to the active development of industries using nuclear technology, the creation of highly effective and cost-effective building materials for protection against hazardous ionizing radiation is of increasing interest. Widespread in the field of radiation-protective building materials are barite-containing concrete. The purpose of this article is to establish the prospects of their use in nuclear facilities, as well as to find ways to improve their technical and operational characteristics. For this an analysis of relevant literature and scientific research in the field of radiation-protective materials and, in particular, barite-containing concrete was carried out. The advantages of barite-containing concrete are high radiation-protective properties, environmental friendliness, high density, as well as economic indicators. The disadvantages are high susceptibility to shrinkage deformation and poor resistance to cyclic temperature effects. The addition of barite to the concrete composition allows to increase the coefficient of linear absorption of γ -rays of the material; also, with the proper selection of the composition, such material may have strength characteristics equal to or superior to the characteristics of concrete with standard compositions. Barite-containing materials have a wide range of applications and can be used both for the production of heavy concrete in the construction of load-bearing structures and in the creation of radiation-protective coatings for walls and floors.

Nikolay V. Novikov, 1-year postgraduate student of the Department of "Technology of Binders and Concrete" of MGSU, eLIBRARY SPIN-code: 8662-1970.

Svetlana V. Samchenko, Professor of the Department of "Technology of Binders and Concrete" of MGSU, Doctor of Technical Sciences, Professor, eLIBRARY SPIN-code: 7537-7350.

Galina E. Okolnikova, Associate Professor of the Department of Construction of Engineering Academy of RUDN University, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, eLIBRARY SPIN-code: 8731-8713, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8143-4614>, okolnikova-ge@rudn.ru

Contribution of authors

Nikolay V. Novikov – writing an article. *Svetlana V. Samchenko* – supervision. *Galina E. Okolnikova* – analysis of information.

References

1. Froggatt A, et al. *World Nuclear Industry Status Report*. 2019.
2. O vnesenii izmenenii v gosudarstvennyuyu programmu Rossiiskoi Federatsii “Razvitie atomnogo energopromyshlennogo kompleksa” [On Amending the State Program of the Russian Federation “Development of the Nuclear Energy and Industrial Complex”]: Decree of the Government of the Russian Federation of March 16, 2020 No. 289-13. *KonsultantPlyus*. Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_348194 (accessed: April 11, 2020).
3. Bazhenov YuM. *Tekhnologiya betona* [Concrete technology]. Moscow: Izd-vo Assotsiatsii vysshikh uchebnykh zavedenii Publ.; 2002. (In Russ.)
4. Laptev GA. Radiatsionnye zashchitnye svoystva metallobetonov [Radiation protective properties of metal concrete]. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzhenii* [Prevention of accidents in buildings and structures]. 2009. Available from: <https://previdis.ru/radiatsionnye-zashhitnye-svoystva-metallobetonov> (accessed: November 4, 2020).
5. Samchenko SV. *Rol ettringita v formirovani i genезise struktury kamnya spetsial'nykh tsementov* [The role of ettringite in the formation and genesis of the stone structure of special cements]. Moscow: Russian Chemical-Technological University named after D.I. Mendeleev; 2005. (In Russ.)
6. Chan Le Hong. *Osobotiazhelyi samouplotnyayushchiysya beton na baritovom zapolnitele* [Extra heavy self-compacting concrete with barite aggregate]: thesis of Cand. of Tech. Sciences. Moscow: MGSU Publ.; 2011. (In Russ.)
7. Korolev EV, Proshin AP, Bazhenov YuM, Sokolova YuA. *Radiatsionno-zashchitnye i korrozionno-stoikiye sernye stroitel'nye materialy* [Radiation-protective and corrosion-resistant sulfur building materials]. Moscow: Paleotip Publ.; 2006. (In Russ.)
8. Proshin AP, Demyanova VS, Kalashnikov DV. *Osobo tyazhelyi vysokoprochnyi beton dlya zashchity ot radiatsii s ispol'zovaniem vtorykhnykh resursov* [Extra-heavy, high-strength concrete for radiation protection using recycled resources]: monograph. Penza: PGUAS Publ.; 2004. (In Russ.)
9. Komarovskiy AN. *Stroitelstvo yadernykh ustanovok* [The construction of nuclear facilities]. Moscow: Atomizdat Publ.; 1969. (In Russ.)
10. Vasilev AA, Shangina NN. Physical and mechanical bases unhardening mineral dispersions for therehabilitation of metal elements of underground structures. *Fundamental research*. 2016;(7–1):14–18. (In Russ.)
11. Raboshchuk DS. Teoreticheskie osnovy pri sozdaniy vysokoeffektivnykh radiatsionno-zashchitnykh materialov dlya zashchity ot ioniziruyushchikh izlucheniy [Theoretical basis for the creation of highly effective radiation-protective materials for protection against ionizing radiation]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU imeni V.G. Shukhova* [International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov] (Belgorod, May 1–30, 2015): proceedings. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov; 2015. p. 340–343. (In Russ.)
12. Kalashnikov VI, Demyanova VS, Kalashnikov DV, Makhambetova KN. Optimizatsiya sostava osobo tyazhelyo vysokoprochnogo betona dlya zashchity ot radiatsii [Optimization of the composition of particularly heavy high-strength concrete for protection against radiation]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2011;(8): 25–28. (In Russ.)
13. Saidani Kh, Ajam L, Ben Oueddou M. Barite powder as sand substitution in concrete: effect on some mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 2015;95:287–295.
14. Akkurt I, Basyigit C, Kilincarslan S, Mavi B. The shielding of γ -rays by concretes produced with barite. *Progress in Nuclear Energy*. 2005;46(1):1–11.
15. Akkurt I, Akyildirim H, Mavi B, Kilincarslan S, Basyigit C. Gamma-ray shielding properties of concrete including barite at different energies. *Progress in Nuclear Energy*. 2010;52(7):620–623.
16. Gökçe HS, Yalçınkaya Ç, Tuyan M. Optimization of reactive powder concrete by means of barite aggregate for both neutrons and gamma rays. *Construction and Building Materials*. 2018;189:470–477.
17. Jankovic K, Stankovic SJ, Stojanovic M, Bojovic D, Antic L. Effect of nano-silica and aggregate type on properties of ultra-high performance concrete. *Cement and its application*. 2017;(4):118–120. (In Russ.)
18. Chernikh TN, Perminov AV, Pudovikov VN, Kramar LYa. Dry barite having mixture for protection against ionizing radiation. *Dry construction mixtures*. 2012;(1): 28–29. (In Russ.)
19. Goncharov YuD, Ryzhov AS. *Sukhaya stroitel'naya smes* [Dry construction mix]: patent 2388715 Russian Federation: C04B 28/30, G21F 1/04, C04B 111/20; applicant and patent holder LLC “Alfapol”. No. 2008142229/03; application October 16, 2008; published May 10, 2010. Bul. No. 13. (In Russ.)

For citation

Novikov NV, Samchenko SV, Okolnikova GE. Barite-containing radiation protective building materials. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):94–98. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-94-98> (In Russ.)