



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

Том 19 № 2 (2018)

DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-2

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

Научный журнал

Издается с 2000 г.

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Агравал Бридж — профессор Навал Постградуейт Скул, Монтерей, США

Варатараджу Ренугант — профессор Университета Путра Малайзия, Малайзия

Герман Анна — профессор Университета Бейра Интериор, Португалия

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

Мисра Арун — профессор Университета МакГилл, Канада

Мортари Даниэль — профессор Техасского университета A&M, США

Спенсер Дэвид — профессор Университета Пенн Стейт, США

Фурфаро Роберто — профессор Университета Аризоны, США

Хоуэлл Кэтлин — профессор, Университет Пердью, Уэсм-Лафайетт, США

Ясака Тетсуо — профессор Эмеритус, Университет Кюсю, Япония

ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ. СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

Периодичность 4 выпуска в год.

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

Языки: русский, английский.

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

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» — 18230.

Цель и тематика

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

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

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

Редактор: *И.В. Успенская*
Компьютерная верстка: *О.Г. Горюнова*

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

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

Подписано в печать 14.07.2018. Выход в свет 29.07.2018. Формат 70×100/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «NewtonС».

Усл. печ. л. 9,99. Тираж 500 экз. Заказ № 438. Цена свободная.

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

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



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

VOLUME 19 NUMBER 2 (2018)

DOI: 10.22363/2312-8143-2018-19-2

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

Founded in 2000

Founder: PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY OF RUSSIA

EDITOR-IN-CHIEF

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

ASSOCIATE EDITOR-IN-CHIEF

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

ASSISTANT TO THE EDITOR-IN-CHIEF

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Valeriy M. Fomin — Professor, Moscow Polytechnic University

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

Renuganth Varatharajoo — Professor, University Putra Malaysia, Malaysia

Anna Guerman — Professor, Universidade da Beira Interior, Portugal

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

Kathleen Howell — Professor, Purdue University, USA

Arun Misra — Professor, McGill University, Canada

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

David Spencer — Professor, Penn State University, USA

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

Roberto Furfaro — Associate Professor, Professor, University of Arizona

Tetsuo Yasaka — Professor Emeritus, Kyushu University, Japan

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

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

Published 4 times a year.

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

Languages: Russian, English

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

Aim and Scope

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

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

The Journal has been included in the list of the leading review journals and editions of the Highest Certification Committee of Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral Theses are to be published.

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

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

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

Address of the editorial board Series "Engineering researches":
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419
Ph. +7 (495) 955-07-92;
e-mail: engjournalrudn@rudn.university

Printing run 500 copies. Open price.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"Peoples' Friendship University of Russia"
6 Miklukho-Maklaya str., 117198 Moscow, Russia

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Белоусов Ю.В., Страшнов С.В. Определение контактных напряжений и зазоров в шарнирах цепных передач	147
Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ощепков П.П. Компрессорный профиль С4: автоматизация проектирования	155
Пак А.Я., Мамонтов Г.Я., Болотникова О.А. Влияние энергии на фазовый состав продукта безвакуумного электродугового синтеза кубического карбида кремния	165

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Дивеев А.И., Доценко А.В. Библиотека Python для синтеза интеллектуальных систем управления	177
---	-----

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬНЫЕ НАУКИ

Александров А.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния здания станционного узла в случае неравномерной осадки и при выравнивании его положения	190
Жиль-улбе М., Маркович А.С., Тупикова Е.М., Журбин Ю.В. Численное моделирование устойчивости линейчатых геликоидальных оболочек	203
Свинцов А.П., Коэн А.Р., Бисиев З.А., Арсамаков И.Ю. Надежность технологической системы возведения жилых зданий в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит	214
Синиченко Е.К., Грицук И.И., Щесняк Л.Е. Современные тенденции развития оборудования, снижающего вредные колебания давления в трубопроводных системах	228

ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО. НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Шапошник Ю.Н., Конуринов А.И., Шокарев Д.А., Шапошник С.Н. Разработка технологии крепления горных выработок в условиях интенсивного окисления сульфидных руд на Орловском месторождении	235
Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. Исследование гранулометрического и химико-минерального составов руды месторождения Томтор	246
Киселевский Е.В., Кумбикила Дж.К., Усова В.М. Физико-химическая технология кучного выщелачивания на месторождении Мкужу Ривер в Танзании	254

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MATERIAL SCIENCE

- Belousov Yu.V., Strashnov S.V.** Determination of contact stresses and gaps in chain transmission hinges..... 147
- Vinogradov L.V., Mamaev V.K., Oschepkov P.P.** Computer-aided design of type C4: compressor blade profile..... 155
- Pak A.Ya., Mamontov G.Ya., Bolotnikova O.A.** Influence of energy on phase composition of end-product obtained by vacuum-free electric arc synthesis of cubic silicon carbide..... 165

COMPUTER SCIENCE, COMPUTATIONAL ENGINEERING AND CONTROL

- Diveev A.I., Dotsenko A.V.** Python package for intelligent control systems synthesis 177

ARCHITECTURE AND CIVIL ENGINEERING

- Aleksandrov A.V.** Numerical modelling of powerhouse structure stress-strain state caused by unequal settlement and during its levelling operations..... 190
- Gil-oulbe Mathieu, Markovich A.S., Tupikova E.M., Zhurbin Yu.V.** Numerical modeling of the buckling resistance of ruled helicoidal shells 203
- Svintsov A.P., Koen A.R., Bisiev Z.A., Arsamakov I.Y.** Reliability of constructing residential buildings using stay-in-place cement board forming technology 214
- Sinichenko E.K., Gritsuk I.I., Shesnyak L.E.** Modern trends in the development of equipment reducing harmful pressure fluctuations in piping systems 228

GEOLOGY, MINING AND OIL&GAS ENGINEERING. EARTH SCIENCE

- Shaposhnik Yu.N., Konurin A.I., Shokarev D.A., Shaposhnik S.N.** Development of technology for supporting mine workings under conditions of intense oxidation of sulfide ores at the Orlovsky mine..... 235
- Malkova M.Yu., Zadiranov A.N.** Study of granulometric and chemical-mineral compositions of Tomtor ore deposit..... 246
- Kiselevskiy E.V., Kumbikila J.K., Usova V.M.** Physico-chemical technology of heap leaching at Mkuju River deposit in Tanzania..... 254



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-147-154

УДК 678.606.55

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ЗАЗОРОВ В ШАРНИРАХ ЦЕПНЫХ ПЕРЕДАЧ

Ю.В. Белоусов¹, С.В. Страшнов²

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

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

² Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

Контактные напряжения в шарнирах цепных передач необходимо знать для оценки их износостойкости, поскольку износ шарниров является наиболее распространенным видом повреждения цепных передач. Определен необходимый зазор между втулкой и валиком цепных передач. Зазор в значительной степени определяет характер распределения и величину контактных напряжений в шарнире, а следовательно, и износостойкость цепных передач. Разработана методика расчета максимальных контактных напряжений в шарнирах цепных передач. Показано, что с уменьшением зазора в шарнирах увеличивается угол контакта между валиком и втулкой и снижаются максимальные контактные напряжения. Однако для реальных углов контакта контактное напряжение сильно превышает допустимое среднее удельное давление, вызывая повышенный износ шарниров. Один из возможных путей решения данной задачи — использование в шарнирах переходных посадок, в которых зазоры и натяги сравнительно невелики. При запрессовке валиков во втулки за счет срезания микронеровностей с контактных поверхностей натяг в соединении практически исчезает. Приведены примеры определения зазоров и контактных напряжений в шарнирах цепных передач.

Ключевые слова: шарниры цепи, контактные напряжения в шарнирах цепи, зазор в шарнирах цепи, посадки шарниров цепи

Введение

Износ шарниров — наиболее распространенный вид повреждения цепей закрытых и полузакрытых передач станков, двигателей и оборудования общего машиностроения. Поэтому основной расчет цепных передач проводят по условию износостойкости шарниров цепи. Для расчета необходимо прежде всего знать контактные напряжения между втулками и валиками цепи. Однако определение напряжений в зонах контакта представляет собой достаточно сложную задачу. Поэтому расчет проводят по условному давлению в шарнирах цепи в предположении нулевого зазора между валиком и втулкой и равномерного распределения давления в шарнире. Кроме того, в ГОСТ 13568—97 на цепи приводные роликовые и в ГОСТ 588—81 на цепи тяговые пластинчатые, а также в литературе по этому вопросу отсутствуют данные о величине необходимого зазора в шарнирах

цепи. Данный зазор в значительной степени определяет характер распределения и величину контактных напряжений в шарнире, а следовательно, и износостойкость цепных передач.

Определение контактных напряжений

Для шарниров цепи диаметр отверстия втулки

$$d_{от} = d + S_{ш},$$

где d — диаметр валика; $S_{ш}$ — зазор в шарнире между втулкой и валиком.

В шарнирах цепи зазоры между втулкой и валиком весьма малы. В связи с этим расчет можно свести к задаче о вдавливании кругового пальца в тело с круговой полостью, которое после приложения нагрузки касается пальца по сравнительно большому участку. Параметры сопряжения здесь можно определить на основе решения контактной задачи теории упругости о внутреннем сжатии двух цилиндрических тел, радиусы которых почти равны. Решение задачи о сжатии цилиндрических тел близких радиусов с учетом трения можно аппроксимировать той же задачей без трения, так как силы трения на поверхности контакта приводят к перераспределению эпюры контактного давления и смещению ее в сторону, противоположную повороту валика передачи. При этом угол смещения ρ центра дуги контакта с большой точностью равен $\text{arctg} f$, а половина угла контакта φ_0 слабо зависит от коэффициента трения f [1; 2; 5; 6].

Для определения напряжений в шарнирах передачи, когда $d_{вт}/d > 1,5$, где $d_{вт}$ — диаметр втулки, примем следующее распределение давления на поверхности контакта:

$$p(\varphi) = C \cdot \cos\left(\frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}\right), \quad (1)$$

где φ — угловая текущая координата.

Тогда максимальное контактное напряжение в шарнире (при $\varphi = 0$) $\sigma_{\max} = C$. Величину C найдем из условия равновесия валика

$$\int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} p(\varphi) \cos \varphi \, d\varphi = \frac{2N_{п}}{d}, \quad (2)$$

где $N_{п} = N/l$ — удельная контактная нагрузка (N — общая нагрузка на шарнир, l — длина втулки), т.е.

$$\int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} C \cdot \cos\left(\frac{\pi\varphi}{2\varphi_0}\right) \cos \varphi \, d\varphi = \frac{2N_{п}}{d}. \quad (3)$$

Откуда

$$C \frac{\pi \cos \varphi_0 \varphi_0}{0,25\pi^2 - \varphi_0^2} = \frac{2N_{\pi}}{d}. \quad (4)$$

При $\varphi_0 = 0,5\pi$, т.е. при равенстве диаметров валика и отверстия втулки, в левой части выражения (4) возникает «неопределенность» вида $0/0$. Для раскрытия неопределенности используем правило Лопиталя:

$$\lim_{\varphi_0 \rightarrow 0,5\pi} \left(\frac{\pi \cos \varphi_0 \varphi_0}{0,25\pi^2 - \varphi_0^2} \right) = \lim_{\varphi_0 \rightarrow 0,5\pi} \left[\frac{(\pi \cos \varphi_0 \varphi_0)'}{(0,25\pi^2 - \varphi_0^2)'} \right] = \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Тогда при $\varphi_0 = 0,5\pi$

$$\sigma_{\max} = C = \frac{4 N_{\pi}}{\pi d} = \frac{4}{\pi} p, \quad (6)$$

где $p = N_{\pi}/d$ — среднее удельное контактное давление в шарнире.

Выражение (6) содержит множитель $4/\pi$, учитывающий серпообразный характер распределения по окружности давлений, такой же, как при расчете соединений с натягом, воспринимающих изгибающий момент.

Из выражения (4)

$$C = \frac{2N_{\pi}}{d} \frac{0,25\pi^2 - \varphi_0^2}{\pi \cos \varphi_0 \varphi_0}. \quad (7)$$

Выразим максимальное контактное напряжение через среднее удельное давление в шарнире

$$\sigma_{\max} = C = kp; \quad k = 2 \frac{0,25\pi^2 - \varphi_0^2}{\pi \cos \varphi_0 \varphi_0}. \quad (8)$$

Расчет максимального контактного напряжения в шарнирах цепной передачи, выполненный по формуле (8), довольно хорошо согласуется с расчетом по существующей методике для подшипников скольжения. Для сравнения вычислим коэффициент k по формуле (8) и сравним его с аналогичным коэффициентом для подшипников скольжения, приведенным в работе [3]. Результаты расчетов приведены на рис. 1. Здесь верхняя линия соответствует расчету по формуле (8), а нижняя — по данным работы [3]. Из рисунка 1 видно, что значение коэффициента k , определенное по формуле (8), несколько выше, особенно для малых полууглов контакта φ_0 . При больших полууглах φ_0 расчеты практически совпадают. Максимальное расхождение не превышает 20%. Однако расчетные зависимости в [3] очень сложны, их результаты приводятся в виде таблицы. Полученная же формула проста и удобна для расчета.

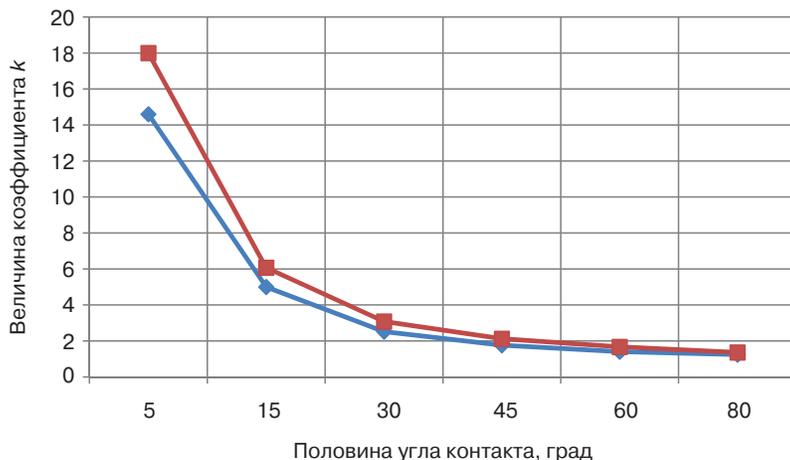


Рис. 1. Зависимость коэффициента k от половины угла контакта φ_0
[Fig. 1. Relationship of the coefficient k to the half contact angle φ_0]

Определение зазоров в шарнирах

Для расчета контактного напряжения необходимо знать величину угла φ_0 . Угол φ_0 является функцией коэффициента нагруженности β , который в данном случае (когда и валик и втулка выполнены из стали) может быть определен по формуле

$$\beta = \frac{2N_{\text{п}}}{\pi \epsilon_{\text{ср}}} \frac{1 - \nu^2}{E}, \quad (9)$$

где $\epsilon_{\text{ср}}$ — средний радиальный зазор в шарнире; E и ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона стали соответственно.

Тогда средний относительный зазор $\psi_{\text{ср}}$ в шарнире

$$\psi_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{ср}}}{d} = \frac{\epsilon_{\text{ср}}}{r}. \quad (10)$$

Для максимальной нагрузки

$$\psi_{\text{ср}} = \frac{4[p]}{\pi\beta} \frac{1 - \nu^2}{E}, \quad (11)$$

где $[p]$ — допускаемое среднее удельное давление в шарнире.

Допускаемое среднее удельное давление в шарнирах роликовых цепей [4]

$$[p] = \frac{[p_0]}{K_3}, \quad (12)$$

где K_3 — коэффициент эксплуатации.

Давление $[p_0]$ зависит от шага цепи и частоты вращения малой звездочки. Наибольшее значение $[p_0] = 35$ МПа соответствует частоте вращения малой звездочки $n < 50$ мин⁻¹. Минимальная величина коэффициента эксплуатации для смазываемых передач $K_s = 0,8$. Тогда $[p]_{\max} = 43,75$ МПа.

Как уже отмечалось, угол φ_0 является функцией коэффициента нагруженности β , которая в [3] задается графически. С использованием этой зависимости выполнен расчет среднего относительного зазора $\psi_{\text{ср}}$ для $[p]_{\max} = 43,75$ МПа и различных полууглов контакта φ_0 . Результаты расчета приведены на рис. 2. При $\varphi_0 > 45^\circ$ требуемые зазоры в шарнире обеспечить технологически достаточно сложно, если учесть также, что при $p < [p]_{\max}$ или даже при $p < [p]$ относительные зазоры в шарнире уменьшаются. Поэтому будем в дальнейшем полагать, что $\varphi_0 \leq 45^\circ$. Для этого диапазона можно предложить следующую зависимость, связывающую полуугол контакта φ_0 со средним относительным зазором $\psi_{\text{ср}}$:

$$\psi_{\text{ср}} \cdot 10^5 = \frac{1,8 \cdot 10^6}{\varphi_0^{2,78}} + 51,4. \quad (13)$$

Для определения самого полуугла контакта φ_0 при $\varphi_0 \leq 45^\circ$ можно предложить следующую зависимость:

$$\varphi_0 = 94\beta^{0,53}. \quad (14)$$

При этом средний диаметральный зазор $S_{\text{ср}} = \psi_{\text{ср}}d$.

Для примера определим полуугол контакта φ_0 и контактное напряжение для случая, когда $p = 20$ МПа, а $S_{\text{ср}} = 0,006d$.

В этом случае

$$\beta = \frac{4 \cdot 20}{\pi \cdot 0,006} \frac{1 - 0,3^2}{2,1 \cdot 10^5} = 0,0184, \text{ а } \varphi_0 = 94(0,0184)^{0,53} = 11,31^\circ.$$

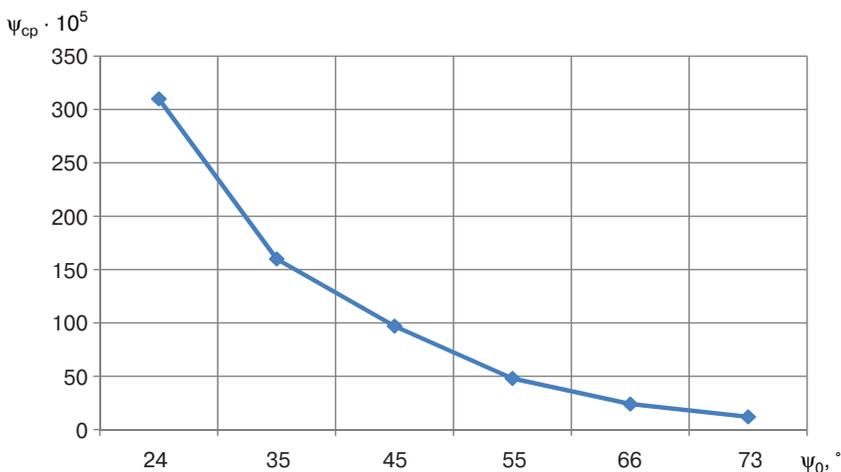


Рис. 2. Зависимость среднего относительного зазора $\psi_{\text{ср}}$ от половины угла контакта φ_0
[Fig. 2.] Relationship of the average relative gap $\psi_{\text{ср}}$ to the half contact angle φ_0

Максимальное контактное напряжение в шарнире

$$\sigma_{\max} = C = kp = 2 \frac{0,25\pi^2 - (11,31\pi/180)^2}{\pi \cos(11,31^\circ)(11,31\pi/180)} 20 = 160 \text{ МПа.}$$

Оно сильно превышает допускаемое среднее удельное давление, вызывая повышенный износ шарниров. Эта тенденция сохраняется для всего диапазона углов $\varphi_0 \leq 45^\circ$.

Заключение

Уменьшить контактное напряжение в шарнирах цепной передачи можно за счет увеличения полуугла контакта валика со втулкой φ_0 , т.е. увеличения коэффициента нагруженности β . Это достигается путем уменьшения среднего радиального зазора в шарнирах $\epsilon_{\text{ср}}$. В этом случае для определения диапазона углов $\varphi_0 > 45^\circ$ можно предложить следующую зависимость:

$$\varphi_0 = 63,46\beta^{0,198}. \quad (15)$$

Для примера найдем средний относительный зазор в шарнирах для $p = 20$ МПа. При $\beta = 2$ ($\varphi_0 = 72,7^\circ$)

$$\psi_{\text{ср}} = \frac{4 \cdot 20 \cdot 1 - 0,3^2}{\pi \cdot 2 \cdot 2,1 \cdot 10^5} = 0,00006.$$

Тогда для цепи ПР-63,5-354 с наибольшим шагом и диаметром валика $d = 19,84$ мм $S_{\text{ср}} = \psi_{\text{ср}} d = 0,00006 \cdot 19,84 = 0,0012$ мм (1,2 мкм). При $\beta = 1$ ($\varphi_0 = 65,8^\circ$) – $\psi_{\text{ср}} = 0,00011$, а $S_{\text{ср}} = 2,2$ мкм. При $\beta = 0,5$ ($\varphi_0 = 55,4^\circ$) – $\psi_{\text{ср}} = 0,00022$, а $S_{\text{ср}} = 4,4$ мкм.

Таким образом, в данном случае необходимые зазоры в шарнирах очень малы и обеспечить их технологически достаточно сложно. Один из возможных путей приближения к решению данной задачи — использование в шарнирах переходных посадок, например, типа Н7/т6 или Н7/к6. В этих посадках вероятность получения зазора и натяга примерно одинакова. Зазоры и натяги сравнительно невелики. При запресовке валиков во втулки за счет срезания микронеровностей с контактных поверхностей натяг в соединении практически исчезает, так как он здесь примерно равен поправке на обмятие (срез) микронеровностей при сборке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Белоусов Ю.В. Анализ условий надежного закрепления заготовок при токарной обработке на станках с ЧПУ // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 19. № 1. С. 91–96.
- [2] Белоусов Ю.В. Моделирование силового взаимодействия инструмента примеханической обработке резанием // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 4. С. 62–66.
- [3] Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: учеб. пособие для машиностр. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.

- [4] Андриенко Л.А., Байков Б.А., Захаров М.Н. и др. Детали машин: учебник для вузов / под ред. О.А. Ряховского. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 465 с.
- [5] Shambina S.L., Rekach F.V., Belousov Y.V. On new modification of some strength criteria for anisotropic materials // *Key Engineering Materials*. Vol. 724. 2016. P. 53–57. *Smart Materials Technologies*.
- [6] Hoffman N.P., Stolz V. Ontransient growth of wear pattern properties // *Wear*. 2010. Vol. 268. № 7-8. P. 886–892.

© Белоусов Ю.В., Страшнов С.В., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 08 февраля 2018

Дата принятия к печати: 17 апреля 2018

Для цитирования:

Белоусов Ю.В., Страшнов С.В. Определение контактных напряжений и зазоров в шарнирах цепных передач // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2018. Т. 19. № 2. С. 147–154. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-147-154

Сведения об авторах:

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

Страшнов Станислав Викторович — кандидат технических наук, старший преподаватель департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов*: детали машин, технология машиностроения. *Контактная информация*: e-mail: shtrafnoy@gmail.com

DETERMINATION OF CONTACT STRESSES AND GAPS IN CHAIN TRANSMISSION HINGES

Yu.B. Belousov¹, S.V. Strashnov²

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

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

Abstract. The article considers the questions of determination of contact stresses in the chain transmission hinges that need to be known for assessing their wear resistance, because the wear and tear of hinges is the most common type of damage to the chain gears. In this context the main attention was paid to determining the required clearance between the bushing and the pin of roller chain drives. This gap largely determines the character of the distribution and magnitude of contact stresses in the hinge, and, consequently, the durability of chain drives. A method of calculation of the maximum contact stresses in the chain transmission hinges is developed. It is shown that decreasing clearance in

the hinges increases the contact angle between the pin and the bushing and reduces the maximum contact pressure. However, for the actual angles of contact the contact stress greatly exceeds the allowable average unit pressure, causing increased wear of the hinges. One of the possible solutions to this problem is the use of transition fits in hinges, in which the gaps and interferences are relatively small. When pressing the pins into the bushings, due to cutting microasperities from the contact surfaces, the interference in the connection virtually disappears. Examples of determining gaps and contact stresses in the chain transmission hinges are provided.

Key words: chain hinges, contact stress chain hinges, gaps in chain hinges, transition fits of chain hinges

REFERENCES

- [1] Belousov Yu.V. Analysis conditions for reliable attach of workpieces during lathe machining on the machines with numerical soft-ware control. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017. Vol. 19. No. 1. P. 91–96. (in Russ.)
- [2] Belousov Yu.V. Modelling of force interaction of the tool during mechanical machining. *Structural mechanics of engineering constructions and buildings*. 2016. No. 4. P. 62–66. (in Russ.)
- [3] Kogaev V.P., Drozdov Yu.N. Prochnost' i iznosostoikost' detalei mashin [Strength and durability of machine parts]. Study guide for mechanical engineering higher education institutions. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1991. 319 p. (in Russ.)
- [4] Andrienko L.A., Baykov B.A., Zakharov M.N. etc. Detali mashin [Machine parts]. Textbook for universities / Under the editorship of O.A. Ryakhovsky. Moscow: Baumanpress Publ., 2014. 465 p. (in Russ.)
- [5] Shambina S.L., Rekach F.V., Belousov Yu.V. On new modifications of some strength criteria for anisotropic materials. *Key Engineering Materials*. Vol. 724. 2016. P. 53–57. Smart Materials Technologies.
- [6] Hoffman N.P., Stolz V. Ontransient growth of wear pattern properties. *Wear*. 2010. Vol. 268. No. 7-8. P. 886–892.

Article history:

Date received: February 08, 2018

Date accepted: April 17, 2018

For citation:

Belousov Yu.B., Strashnov S.V. (2018). Determination of contact stresses and gaps in chain transmission hinges. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 147–154. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-147-154

Bio Note:

Yury V. Belousov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Fundamentals of Machine Construction, Moscow State Technical University. *Research interests:* machine parts, mechanical engineering. *Contact information:* e-mail: belou.80@mail.ru

Stanislav V. Strashnov — Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer, Department of Architecture and Construction, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* machine parts, mechanical engineering. *Contact information:* e-mail: shtrafnoy@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-155-164

УДК 621.165.533

КОМПРЕССОРНЫЙ ПРОФИЛЬ С4: АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Л.В. Виноградов, В.К. Мамаев, П.П. Ощепков

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

В работе представлены результаты проектирования компрессорного профиля типа С4 с использованием системы автоматизированного проектирования (САПР). В САПР реализован метод нелинейных преобразований Гирста. Все вычисления и графические построения выполнены в интегрированном математическом пакте MathCAD. Для вычислений и построений средняя линия профиля аппроксимируется кривой Безье 2-го порядка с углами наклона касательных в начальной и конечной точках этой кривой, определяемых углом поворота потока в решетке профилей в соответствии с расчетом проточной части компрессора. В работе определены координаты точек сопряжения окружностей входной и выходной кромок с выпуклой и вогнутой частями профиля (спинка и корытце профиля). Спинка и корытце симметричного исходного профиля аппроксимируются дугами окружностей входной и выходной кромок и тремя кривыми Bezier 2-го порядка. После аппроксимации обводов исходного профиля было получено интегральное уравнение исходного симметричного компрессорного профиля типа С4. Аналитическое описание обводов профиля и средней линии дало возможность осуществить нелинейные преобразования Гирста и получить сначала уравнение изогнутого профиля, затем построить одиночный профиль типа С4, потом записать уравнение решетки профилей с заданным углом установки профиля в решетке и соответствующим шагом и построить графический образ компрессорной решетки. В исходной системе координат рассчитаны геометрические параметры симметричного компрессорного профиля, необходимые для прочностных расчетов.

Ключевые слова: компрессор, профиль С4, решетка, САПР, нелинейные преобразования

Введение

Сложные обводы и поверхности получили широкое распространение в лопаточных машинах (компрессоры и турбины). Проектирование и расчет таких обводов и поверхностей с применением современной вычислительной техники, а также воспроизведение на станках с программным управлением требует их корректного математического описания [1]. Одним из современных методов конструирования поверхностей является метод нелинейных преобразований, который позволяет получать искомую поверхность (обвод) как образ плоскости или какой-либо известной кривой.

Данные и методы

В работе применено преобразование Гирста I_2 с несобственным центром F_1^∞ [1]. У рассматриваемой специализации криволинейных инволюций I_n с несобственным центром F_1^∞ есть очень важное метрическое свойство: такое преобразование является эквиформным, т.е. сохраняются площади прообраза и образа.

В использованной специализации квадратичной инволюции I_2 инвариантной коникой является квадратичная парабола d^2 в виде кривой Bezier 2-го порядка.

Прообразом компрессорного изогнутого профиля является симметричный исходный компрессорный профиль С4 [2; 3], аэродинамические характеристики которого известны из экспериментальных данных.

Все вычисления и построения выполнены в интегрированном математическом пакете MathCAD [5], для чего была разработана система автоматизированного проектирования (САПР) и подпрограмма для расчета координат опорных точек полиномов Bezier 2–5-го порядков (Pp — «Опорные точки»).

Объектом построения был профиль С4 [2], симметричный, с максимальной относительной толщиной 10%, хордой профиля 100 мм, относительная абсцисса сечения с максимальной толщиной — 30%, радиус входной кромки $r_1 = 1,2$ мм, радиус выходной кромки $r_2 = 0,6$ мм. Ниже приведена матрица координат обвода исходного профиля, где первая строка — абсциссы, вторая — ординаты. (Матрица параллельно записывается в текстовой структурированный файл для возможности последующего ее использования в других САПР.)

Матрица координат компрессорного профиля С4

0	1,25	2,5	5,0	7,5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
0	1,65	2,27	3,08	3,62	4,02	4,55	4,83	5,0	4,89	4,57	4,05	3,37	2,54	1,60	1,06	0

На рисунке 1 показан векторный график исходного профиля. График строится для получения первичного образа (прообраза) объекта проектирования и контроля корректности исходных данных и их ввода.

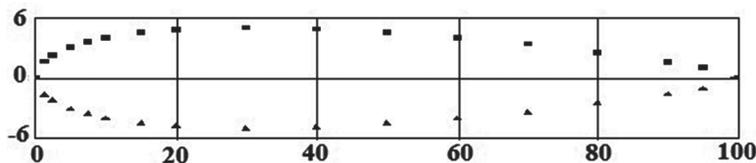


Рис. 1. Векторный график симметричного профиля С4: ■ — верхний обвод профиля; ▲ — нижняя половина обвода профиля

[Fig. 1. Vector plot of symmetric C4 blade profile: ■ — top part contour; ▲ — bottom part contour]

Результаты вычислений

Для последующих вычислений векторы обводов исходного профиля были интерполированы кубическими сплайнами, для чего в пакете MathCAD [5] имеется стандартная функция, позволяющая работать как с аналитическими функциями.

На рисунке 2 VS_{vxx}, VS_{vxy} — векторы абсцисс и ординат спинки профиля, $x_1(\Theta)$, $y_1(\Theta)$ — параметрическое уравнение окружности входной кромки.

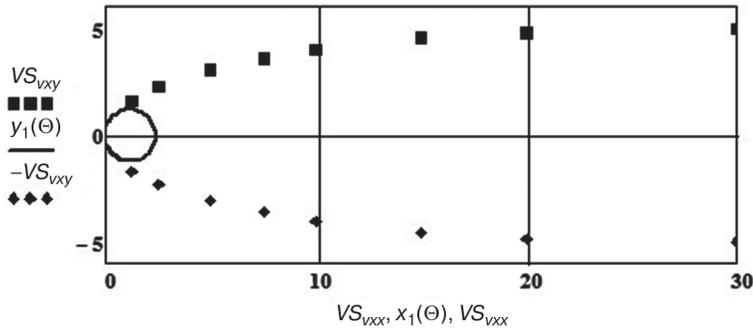


Рис. 2. Область входной кромки профиля: ■ — верхний обвод профиля; ◆ — нижняя половина обвода профиля; — — входная кромка профиля
[Fig. 2. Leading edge of the blade profile: ■ — top part contour; ◆ — bottom part contour; — — leading edge]

Для начала аппроксимации вариантными расчетами были определены координаты начальной точки (абсцисса и ордината) A :

$$XA \equiv 0.2YA(x) = \sqrt{r_1^2 - (x - r_1)^2} YA = YA(XA)YA = 0.663325.$$

Начальная точка A расположена на окружности входной кромки, и аппроксимационная кривая должна быть касательной к этой окружности. Эта точка является одной (левой) опорной точкой характеристического треугольника аппроксимационной кривой Bezier. Правая опорная точка C характеристического треугольника определялась методом последовательного приближения — перебором точек матрицы координат профиля. Для первого аппроксимационного участка правой опорной точкой стала точка вектора с индексом 9.

Для расчета вектора опорных точек полиномов Bezier применялась разработанная подпрограмма

$$Pp_basic_point(XA, x_C, YA, y_C, \alpha_A, \alpha_C, 2).$$

Формат матрицы исходных данных для этой подпрограммы имеет вид

$$Pp_basic_point(XA, x_C, YA, y_C, \alpha_A, \alpha_C, 2),$$

где — XA, YA, x_C, y_C — координаты правой и левой (конечных) опорных точек кривой Bezier; α_A, α_C — углы наклона касательных в этих точках.

Подпрограмма формирует матрицу координат опорных точек полиномов Bezier и параметрические уравнения соответствующих полиномов.

Ниже приведена матрица координат опорных точек для профиля С4.

Матрица координат опорных точек полиномов Bezier

$$V1 = \begin{pmatrix} 0.2 & 3.528 & 40 & 0.2 & 0.663 & 1.032 & 1.918 & 6.423 & 3.073 \\ 0.663 & 5.681 & 4.89 & 1.864 & 3.172 & 11.814 & 4.229 & 21.348 & 4.658 \\ 0 & 0 & 0 & 21.764 & 5.285 & 30.882 & 5.088 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40 & 4.89 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

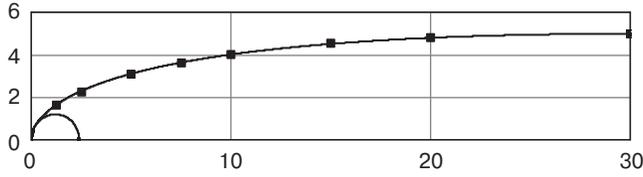


Рис. 3. Начальный участок аппроксимации обвода спинки: — — аппроксимационная кривая Безье; ■ — исходные точки контура профиля С4
[Fig. 3. Initial region of approximation for blade back contour: — — Bézier approximation curve; ■ — points of original C4 blade profile contour]

На рисунке 3 показан первый (начальный) участок аппроксимации.

Второй аппроксимационный участок начинается с элемента вектора с индексом 9 (последний элемент первого аппроксимационного участка) до 14. Крайний правый элемент второго участка определялся методом последовательного подключения крайнего элемента к вектору характеристического треугольника второго участка. Координаты опорных точек кривой Bezier 2-го участка рассчитываются по подпрограмме, которая ранее уже использовалась. На рисунке 4 показан второй участок аппроксимации первичного профиля.

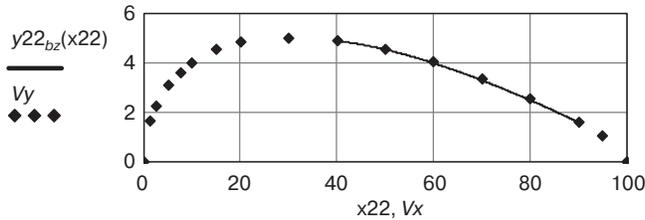


Рис. 4. Второй аппроксимационный участок спинки профиля, построенный по уравнению $y_{22_{bz}}(x_{22})$
[Fig. 4. Second approximation region for blade back contour constructed on the basis of $y_{22_{bz}}(x_{22})$ equation]

Третий заключительный участок аппроксимации включал элемент с индексом 14 (последний элемент второго участка) и окружность выходной кромки. Определение параметров правой опорной точки характеристического треугольника было выполнено методом последовательного приближения, задавая абсциссу точки на окружности выходной кромки. Для профиля С4 абсцисса этой точки была определена как $x_C = 94,7$.

По аналогии с предыдущими интервалами координаты опорных точек полиномов были определены по подпрограмме *Pp* — «Опорные точки».

После аппроксимации трех участков были записаны уравнения обвода спинки профиля С4 в виде

$$S_{C4}(x) = \begin{cases} \sqrt{r_1^2 - (x - r_1)^2} & \text{if } 0 \leq x \leq 0.2 \\ y_{2_{bz}}(x) & \text{if } 0.2 < x \leq 40 \\ y_{22_{bz}}(x) & \text{if } 40 < x \leq 90 \\ y_{222_{bz}}(x) & \text{if } 90 < x \leq 99.47 \\ \sqrt{r_2^2 - [x - (b - r_2)]^2} & \text{if } 99.47 < x \leq b \end{cases} .$$

В силу симметрии уравнение корытца можно записать в виде

$$W_{C4}(x) = -S_{C4}(x).$$

На рисунке 5 показан симметричный исходный компрессорный профиль $C4$, аппроксимированный двумя окружностями входной и выходной кромок, тремя кривыми Bezier 2-го порядка и построенный по вышеприведенным уравнениям.



Рис. 5. Профиль $C4$, построенный двумя окружностями входной и выходной кромок и тремя кривыми Безье 2-го порядка
[Fig. 5. $C4$ blade profile constructed by two circles of leading and trailing edges and three second-order Bézier curves]

Построение изогнутого профиля методом нелинейных преобразований было выполнено по уравнениям вида

$$S_{NL}(x) = Lmid_{C4}(x) - S_{C4}(x)$$

$$W_{NL}(x) = Lmid_{C4}(x) - W_{C4}(x)$$

где $Lmid_{C4}(x)$ — инвариантная кривая 2-го порядка в виде кривой *Bezier* с углом на входе $\chi_1 = 14^\circ$, на выходе $\chi_2 = -10^\circ$, т.е. угол поворота потока в решетке $\vartheta = 24^\circ$, что соответствует практически максимальному углу поворота в компрессорной решетке [2].

Следует отметить, что при изгибе симметричного профиля инвариантная кривая является средней линией изогнутого профиля.

Параметры характеристического треугольника для инвариантной кривой были рассчитаны по подпрограмме расчета опорных точек. На рисунке 6 представлены изогнутый профиль и инвариантная кривая — средняя линия профиля.

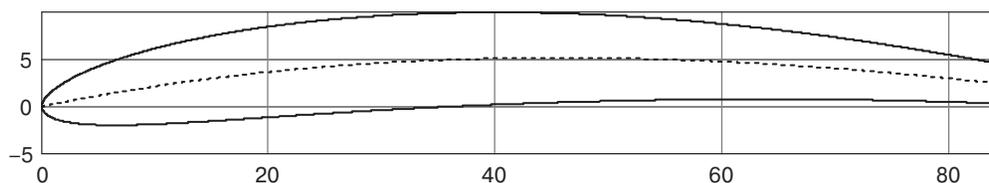


Рис. 6. Фрагмент изогнутого компрессорного профиля:
 ... — инвариантная кривая (средняя линия); — — обвод профиля
[Fig. 6. Fragment of curved compressor blade profile:
 ... — invariant curve (centreline); — — profile contour]

На рисунке 7 показана решетка компрессорных профилей типа $C4$ с углом установки профиля в решетке $\gamma = 70^\circ$, относительным шагом $t = 1$.

Параметрические уравнения координат изогнутого профиля решетки имеют вид

$$x'(x) = x \cdot \cos\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + S_{NL}(x) \cdot \sin\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$y'(x) = -x \cdot \sin\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + S_{NL}(x) \cdot \cos\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$x'w(x) = x \cdot \cos\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + W_{NL}(x) \cdot \sin\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

$$y'w(x) = -x \cdot \sin\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right) + W_{NL}(x) \cdot \cos\left(70 \cdot \frac{\pi}{180}\right)$$

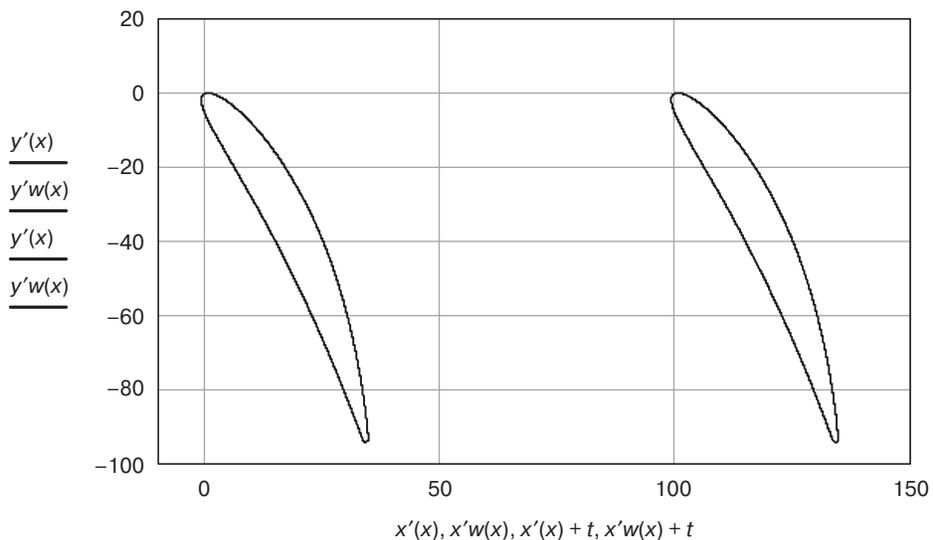


Рис. 7. Решетка изогнутых компрессорных профилей типа С4 с углом установки $\gamma = 70^\circ$ и относительным шагом $t = 1$

[Fig. 7.] Cascade of curved C4 compressor blade profiles with angle of incidence $\gamma = 70^\circ$ and pitch ratio $t = 1$

Аналитические зависимости обводов профиля удобны для расчета геометрических характеристик профиля, которые используются в прочностных расчетах [2]. В таблице представлены наименования, формулы, имена по программам и численные значения геометрических параметров изогнутого профиля С4 в исходной системе координат.

На рисунке 8 представлен изогнутый компрессорный профиль С4 с главными центральными осями.

Геометрические параметры изогнутого профиля С4
[Table. Geometric parameters of curved C4 compressor blade profile]

№ п/п	Наименование параметров	Имя	Значение
1	Площадь профиля [Profile area] $F = \int_0^b (W_{NL}(x) - S_{NL}(x)) dx$	F	$F = 718.926$
2	Статический момент инерции площади относительно оси x [First moment of area relative to x -axis] $S_x = \int_0^b \int_{S_{NL}(x)} s ds dx$	S_x	$S_x = 2.805 \cdot 10^3$
3	Статический момент инерции площади относительно оси y [First moment of area relative to y -axis] $S_y = \int_0^b \int_{S_{NL}(x)} x ds dx$	S_y	$S_y = 3.117 \cdot 10^4$
4	Момент инерции площади относительно оси x [Second moment of area relative to x -axis] $J_x = \int_0^b \int_{S_{NL}(x)} s^2 ds dx$	J_x	$J_x = 1.635 \cdot 10^4$
5	Момент инерции площади относительно оси y [Second moment of area relative to y -axis] $J_y = \int_0^b \int_{S_{NL}(x)} x^2 ds dx$	J_y	$J_y = 1.778 \cdot 10^6$
6	Центробежный момент инерции [Product moment of area] $J_{xy} = \int_0^b \int_{S_{NL}(x)} x \cdot s ds dx$	J_{xy}	$J_{xy} = 1.24 \cdot 10^5$
7	Абсцисса центра тяжести профиля [x-coordinate of centre of gravity] $X_C = S_y \cdot F^{-1}$	X_C	$X_C = 43.356$
8	Ордината центра тяжести [y-coordinate of centre of gravity] $Y_C = S_x \cdot F^{-1}$	Y_C	$Y_C = 3.902$
9	Момент инерции площади относительно оси ординат центральных осей [Second moment of area relative to centroid y -axis] $J_{y_1} = J_y - X_C^2 \cdot F$	J_{y_1}	$J_{y_1} = 4.263 \cdot 10^5$
10	Момент инерции площади относительно оси абсцисс центральных осей [Second moment of area relative to centroid x -axis] $J_{x_1} = J_x - Y_C^2 \cdot F$	J_{x_1}	$J_{x_1} = 5.402 \cdot 10^3$
11	Центробежный момент инерции относительно центральных осей [Product moment of area relative to centroid axes] $J_{x_1 y_1} = J_{xy} - X_C \cdot Y_C \cdot F$	$J_{x_1 y_1}$	$J_{x_1 y_1} = 2.36 \cdot 10^3$
12	Максимальный момент инерции относительно главных центральных осей [Maximum moment of area relative to centroid axes] $J_{\max} = (J_{x_1} + J_{y_1}) \cdot 2^{-1} + S_{qr}$	J_{\max}	$J_{\max} = 4.263 \cdot 10^5$
13	Минимальный момент инерции относительно главных центральных осей [Minimum moment of area relative to centroid axes] $J_{\min} = (J_{x_1} + J_{y_1}) \cdot 2^{-1} - S_{qr}$	J_{\min}	$J_{\min} = 5.389 \cdot 10^3$
14	Угол наклона главных центральных осей относительно исходной системы координат [Angle of inclination of centroid axes relative to the original coordinate system] $\varphi = \arctan \left[J_{x_1 y_1} \cdot \frac{1}{(J_{y_1} - J_{\min})} \right]$	φ	$\varphi \cdot \frac{180}{\pi} = 0.321$

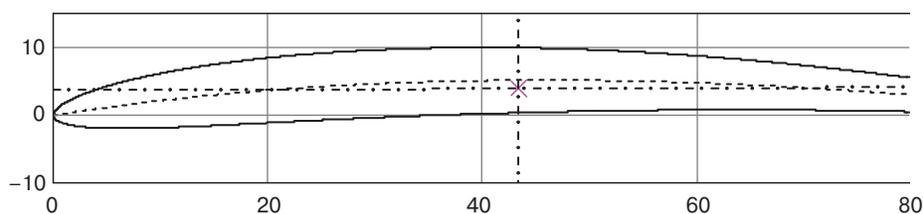


Рис. 8. Фрагмент изогнутого компрессорного профиля С4:

--- — главные центральные оси; ... — средняя линия; — — обвод профиля

[**Fig. 8.** Fragment of curved C4 compressor blade profile:

--- — centroid axes; ... — centreline; — — profile contour]

Выводы

Разработана в MathCAD система САПР для проектирования компрессорного профиля типа С4 и решетки на его базе.

Получено аналитическое описание обводов исходного симметричного и изогнутого профилей, а также решетки на его базе.

Аналитическая форма описания обводов профиля позволяет рассчитать геометрические параметры профиля, необходимые для расчетов на прочность, а также аналитически исследовать изменение тех характеристик обводов по длине хорды профиля или обвода, которые определяют газодинамические параметры течения и свойства пограничного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Иванов Г.С.* Конструирование технических поверхностей (математическое моделирование на основе нелинейных преобразований). М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
- [2] *Холщевников К.В.* Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1970. 610 с.
- [3] *Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б., Анисимов С.А., Митрофанов В.П., Подобуев Ю.С.* Теория и расчет турбокомпрессоров Л.: Машиностроение (Ленинградское отделение), 1987. 392 с.
- [4] *Скубачевский Г.С.* Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. 5-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. 550 с.
- [5] *Макаров Е.* Инженерные расчеты в MathCAD: учебный курс. СПб.: Питер, 2003. 448 с.

© Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ощепков П.П., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 02 февраля 2018

Дата принятия к печати: 17 апреля 2018

Для цитирования:

Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ощепков П.П. Компрессорный профиль С4: автоматизация проектирования // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 2. С. 155–164. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-155-164

Сведения об авторах:

Виноградов Леонид Валерьевич — кандидат технических наук, доцент, учебный мастер департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский

университет дружбы народов. *Область научных интересов*: системы автоматизированного проектирования, лопаточные машины, газодинамика лопаточных машин. *Контактная информация*: e-mail: vinogradov_lv@rudn.university

Мамаев Владимир Константинович — старший преподаватель департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов*: системы автоматизированного проектирования, турбомашин, акустические и волновые процессы. *Контактная информация*: e-mail: mamaev_vk@rudn.university

Ощепков Петр Платонович — кандидат технических наук, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов*, системы автоматизированного проектирования, эксплуатация двигателей внутреннего сгорания, альтернативные топлива. *Контактная информация*: e-mail: oshchepkov_pp@rudn.university

COMPUTER-AIDED DESIGN OF TYPE C4: COMPRESSOR BLADE PROFILE

L.V. Vinogradov, V.K. Mamaev P.P. Oschepkov

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

Abstract. The paper presents the results of designing a compressor blade profile of type C4 using CAD, which implements the method of nonlinear transformation. Girst transformation was used by the authors. All calculations and graphical representations were made in the computer algebra system Mathcad. For the calculation and graphical representation the centreline is approximated with three nonlinear segments in the form of second order Bezier curve. After determining the first and last point of the second order Bezier curve, the coordinates of the middle point on the intersection of tangential lines that start at the first and last point of the curve are determined. After the approximation of three sections with second order Bezier curves the integral function of the blade back (convex side of the contour) of the profile C4 considering the leading and trailing edges are made as arcs. According to the analytical formulas, the geometric parameters of the curved profile were calculated, which are necessary for calculating the strength of the compressor blade.

Key words: compressor, computer-aided design, profile C4, nonlinear transformation

REFERENCES

- [1] Ivanov G.S. *Konstruirovaniye tekhnicheskikh poverkhnostey (matematicheskoye modelirovaniye na osnove nelineynykh preobrazovaniy)* [Design of technical surfaces (mathematical modelling on the basis of nonlinear transformations)]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1987. 192 p. (in Russ.)
- [2] Holshevnikov K.V. *Teoriya i raschet aviatsionnykh lopatochnykh mashin* [Theory and analysis of aircraft impeller machines]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1970. 610 p. (in Russ.)
- [3] Seleznev K.P., Galyorkin J.B., Anisimov S.A., Mitrofanov V.P., Podobuev U.S. *Teoriya i raschet turbokompressorov* [Theory and analysis of turbocompressors]. L.: Mashinostroeniye Publ. (Leningradskoye otdeleniye), 1986. 392 p. (in Russ.)

- [4] Skubachvsky G.S. Aviatsonnyye gazoturbinnye dvigateli. Konstruktsiya i raschet detalei [Aircraft gas turbine engines. Construction and analysis of parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 550 p. (in Russ.)
- [5] Makarov E. Inzhenernye raschety v MathCAD: uchebnyi kurs [Engineering calculations in Mathcad. Educational course]. SPb.: Piter, 2003. 448 p. (in Russ.)

Article history:

Received: February 02, 2018

Date accepted: April 17, 2018

For citation:

Vinogradov L.V., Mamaev V.K., Oshepkov P.P. (2018). Computer-aided design of type C4: compressor blade profile. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 155–164. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-155-164

Bio Note:

Leonid V. Vinogradov — Candidate of Technical Sciences, education master of the Department of Mechanical and Tool Engineering at the Academy of Engineering of Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* computer aided design systems, turbines, gas dynamic of turbomachines. *Contact information:* e-mail: vinogradov_lv@rudn.university

Vladimir K. Mamaev — senior professor of the Department of Mechanical and Tool Engineering at the Academy of Engineering of Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* computer aided design systems, turbines, acoustic and wave processes. *Contact information:* e-mail: mamaev_vk@rudn.university

Petr P. Oshchepkov — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Mechanical and Tool Engineering at the Academy of Engineering of Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* computer aided design systems, internal combustion engines operation, alternative fuels. *Contact information:* e-mail: oshchepkov_pp@rudn.university



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-165-176

УДК 54.057

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПРОДУКТА БЕЗВАКУУМНОГО ЭЛЕКТРОДУГОВОГО СИНТЕЗА КУБИЧЕСКОГО КАРБИДА КРЕМНИЯ

А.Я. Пак, Г.Я. Мамонтов, О.А. Болотникова

Томский политехнический университет
Российская Федерация, 634050, Томск, пр-т Ленина, 30

Изложены научно-технические основы безвакуумного плазменного метода получения карбида кремния, реализуемого при помощи дугового разряда постоянного тока между графитовыми электродами. В ходе серии экспериментов изменялась подведенная к системе энергия путем увеличения длительности горения дугового разряда при неизменном значении силы тока (165 А). В работе использовались два типа прекурсоров: 1) смесь порошкового кремния с рентгеноаморфным углеродом в виде микроразмерных волокон; 2) с порошковым углеродом; соотношение масс в исходной смеси составляло Si:C = 2:1. В результате оценки количественного состава продукта синтеза определены параметры эксперимента, которые позволяют добиться максимального содержания искомой фазы карбида кремния (до 45%). Определены параметры, при которых единственной примесной фазой в продукте является графит; в результате удалось отжигом в атмосферной печи при температуре 900 °С обеспечить очистку продукта от несвязанного углерода и тем самым получить карбид кремния с содержанием около 99%. Этот результат обеспечивают два фактора: наличие в составе смеси исходных реагентов углеродных волокон и достаточный уровень подведенной энергии порядка 216 кДж/г.

Ключевые слова: карбид кремния, безвакуумный метод, электродуговой синтез, влияние прекурсоров, рентгеновская дифрактометрия, электронная микроскопия

Введение

Материалы на основе карбида кремния благодаря ряду важных свойств применяются в различных отраслях науки и техники [1; 2]. Наибольший интерес в современном мире проявляется к таким характеристикам материалов и изделий на основе карбида кремния, как сверхтвердость, стойкость к высоким температурам в воздушной среде, коррозионная стойкость, стойкость к химически активным средам, стабильные в широком диапазоне температур полупроводниковые свойства [1; 2]. Одним из возможных путей получения материалов на основе карбида кремния является электродуговой метод [3], считающийся относительно простым в реализации, но дорогостоящим для промышленного производства, в связи с этим в настоящее время ведутся работы по оптимизации режимов и поиску недорогих катализаторов, исходных реагентов и иных расходных материалов [4]. В частности, ведутся работы по использованию природного угля для изготов-

ления электродов электродуговой системы, а также в качестве исходного источника углерода для проведения синтеза различных материалов [5]. Кроме того, известны работы, в которых излагается подход к модернизации электродугового метода: получение углеродных ультрадисперсных материалов в воздушной среде при нормальном или пониженном давлении, что дает потенциально значительный экономический эффект за счет снижения стоимости оборудования, потребления электрической энергии и расходных материалов путем исключения из системы вакуумно-газового оборудования и непосредственно корпуса реактора в его традиционном исполнении [6]. Подобные системы функционируют за счет генерации СО и активного потребления кислорода в пространстве, окружающем электродуговую плазму, инициированную на графитовых электродах в воздушной среде [7]. Анализ специальной литературы показывает, что в настоящее время такой подход применяется исключительно в целях синтеза углеродных ультрадисперсных материалов, авторами не найдены документальные свидетельства применения подобного метода для получения карбидных материалов. Таким образом, разработка научно-технических основ безвакуумного метода получения карбида кремния, в частности, вопрос влияния исходных параметров электродуговой системы и используемых прекурсоров на фазовый состав продукта электродугового синтеза является актуальной задачей.

Методика проведения исследований

Экспериментальные исследования проводились на разрабатываемой в Томском политехническом университете лабораторной электродуговой установке постоянного тока. Основой разрабатываемой системы является источник тока (до 200 А), к клеммам которого подключаются графитовые электроды. Дуговой разряд поджигается в результате соприкосновения электродов и отведения анода от катода на расстояние 2–3 мм для формирования разрядного промежутка. Исходный материал для синтеза нарабатывается электроэрозионным путем с поверхности графитового анода, а также подается в зону формирования плазменного разряда. Напряжение на разряде регистрировалось посредством омического делителя напряжения (10:1), параллельно которому для подавления высокочастотных помех устанавливался емкостной фильтр; полученный таким образом сигнал подавался на цифровой осциллограф Rigol DS1052 E (полоса пропускания 50 МГц). Контроль уровня силы тока обеспечивался встроенным в источник питания стабилизатором, определялся предустановленным значением 165 А. Умножением силы тока (как неизменной величины во времени) на величину напряжения на разряде получена функция мощности, интегрированием которой по времени определена величина подведенной в процессе рабочего цикла энергии. Время горения разряда определялось заранее и задавалось оператором установки, в каждом эксперименте определена длительность горения дугового разряда по зарегистрированной кривой на экране осциллографа с погрешностью не более 0,2 с.

По описанной выше методике всего проведено 17 экспериментов; в настоящей работе обсуждаются две серии экспериментов: в первой серии в качестве исходного источника углерода использовалась сажа (рентгеноаморфный углерод, сред-

ний размер частиц порядка 100 нм), во второй серии использовались углеродные волокна со средней длиной около 100–150 мкм и поперечным размером порядка 10–20 мкм. Массовое соотношение в смеси исходных реагентов составило Si:C = 2:1, в зону формирования плазменной структуры вносилось по 0,4 г приготовленной смеси кремния и углерода в каждом эксперименте. Исходная смесь перед проведением эксперимента помещалась в цилиндрическое отверстие в катоде. Масса исходных реагентов, продукта синтеза и электродов определялась при помощи цифровых весов с погрешностью изменений около 0,05 г.

Полученные материалы собирались с поверхности электродов и затем анализировались методами рентгеновской дифрактометрии (XRD, ShimadzuXRD7000s, Cu-катод), растровой электронной микроскопии (JeolJSM 7500F).

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1, а представлена типичная осциллограмма напряжения, соответствующая длительности поддержания дугового разряда постоянного тока 10 с. Форма зависимости $u(t)$ представляется естественной для рассматриваемых условий проведения эксперимента: в момент подачи напряжения на электроды разность потенциалов между ними составила ~ 62 В, что с погрешностью не более ± 2 В соответствует заявленному производителем напряжению холостого хода источника питания; далее при соприкосновении электродов напряжение снижается до $\sim 30...31$ В и при образовании разрядного промежутка поднимается и стабилизируется в пределах $\sim 40...46$ В; далее при увеличении расстояния между электродами напряжение на дуговом разряде поднимается до $\sim 54...55$ В, и разряд гаснет, при этом напряжение на электродах поднимается снова до уровня холостого хода источника. Ход кривой напряжения при умножении массива на постоянную величину тока (165 А) определил форму кривой мощности, характер которой в данном случае очевиден. Отметим, что максимальное значение мощности достигло приблизительно 9,0–9,5 кВт. Данная электрическая мощность обеспечила выделение электрической энергии около 72 кДж в течение 10 с. Характер осциллограмм практически идентичен во всех проведенных экспериментах и качественно не отличается в зависимости от типа исходных реагентов и длительности поддержания дугового разряда.

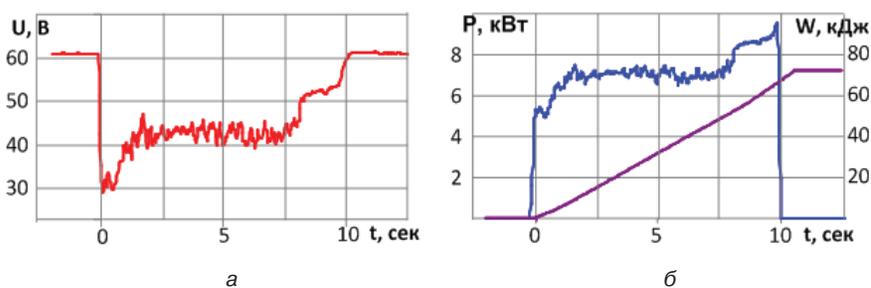


Рис. 1. Типичная зарегистрированная осциллограмма напряжения (а) и рассчитанные по экспериментальным данным кривые мощности и выделения энергии (б)
[Fig. 1. Typical voltage oscillogram (a), experimental energy production and power curves (b)]

Исходный порошок до обработки электродуговой плазмой, судя по данным рентгеновской дифрактометрии (рис. 2, дифрактограмма 1), состоит из кубического кремния Si(cubic) и рентгеноаморфного углерода, о наличии которого можно судить по широкому гало в диапазоне $2\theta = 23\text{--}27$ град. По данным качественного рентгенофазового анализа, во всех образцах — продуктах синтеза идентифицируются три основных кристаллических компонента (рис. 2, дифрактограммы 2 и 3): графитоподобный углерод C (graphite), исходный кремний Si (cubic) и карбид кремния SiC (cubic). Сопоставление сведений из международной базы данных PDF4+ с экспериментальными дифрактограммами позволило идентифицировать четыре кристаллические фазы: кубический SiC [ICDD 00-029-1129], кубический кремний [ICDD 01-071-4631] и две графитоподобные углеродные фазы, отличающиеся параметрами элементарной ячейки [ICDD 01-075-1621; ICDD 00-058-1638]. Средний параметр решетки для фазы кубического SiC составил $4,3571\text{\AA}$ при среднекватическом отклонении равном $0,0015\text{\AA}$ (величины определены по данным 13 экспериментов, отличающихся подведенной к системе энергии). Полученная величина соответствует эталонной в пределах точности измерений и возможных погрешностей.

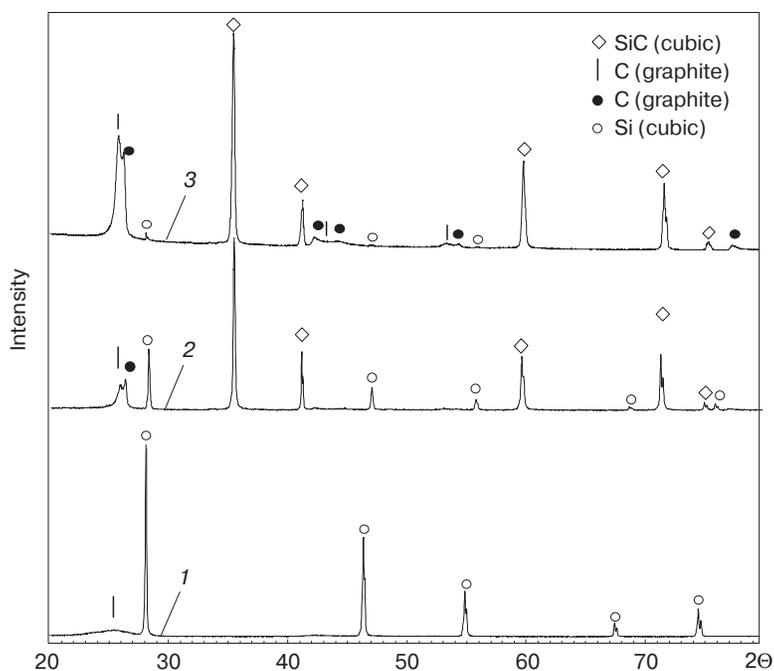


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы: 1 — исходной смеси; 2 — типичная дифрактограмма продукта синтеза, полученного из смеси порошковых углерода и кремния; 3 — типичная дифрактограмма продукта синтеза, полученного из смеси углеродных волокон и порошкового кремния

[Fig. 2. X-ray diffraction patterns: 1 — initial raw powder; 2 — typical pattern of end-product made of carbon and silicon powders; 3 — typical pattern of end-product made of carbon microfibers and silicon powder]

Синтез не оксидного, а именно карбидного материала в рассматриваемой системе с учетом последних тенденций развития электродугового метода представляется возможным. Графитовые электроды в процессе горения дугового разряда

генерируют защитную атмосферу состава CO [6; 7], существование которой в пространстве и времени достаточно для перехода системы согласно диаграмме состояний системы Si-C от высоких температур плазменного факела до более низких температур формирования карбида кремния [8]. Нахождение системы Si-C в зоне избытка углерода определяет формирование фаз кубического карбида кремния и графита. Поэтому обнаруженную в составе продукта фазу кубического кремния, очевидно, можно считать остатками непрореагировавшего кремния исходной смеси, загружаемой в зону горения дуги. В связи с этим напрашивается гипотеза о возможности получения двухфазного продукта, состоящего из кубического карбида кремния и графита при достаточном уровне подведенной энергии для переработки исходного кремния.

По данным количественного рентгенофазового анализа, содержание искомой фазы карбида кремния может составлять в продукте до ~45% (масс), при этом явной и однозначной зависимости на данном этапе исследований между содержанием карбида кремния и одного из предустановленных параметров экспериментальной установки с однозначным высоким уровнем повторяемости экспериментов не удалось установить. Препятствует установлению однозначной зависимости процесс электрической эрозии электродов, влияющий на массу продукта синтеза и, соответственно, на доли компонентов в его составе наряду с плановым изменением в ходе серии экспериментов какого-либо параметра. Рассматриваемое явление считается общепризнанным недостатком группы методов, основанных на электродуговых явлениях постоянного тока [9], особенно с точки зрения внесения примесей в продукт синтеза. Тем не менее попытка управления фазовым составом продукта и в целях оценки влияния энергии дугового разряда на фазовый состав продукта построена зависимость фазового состава и массы эрозии анода от подведенной энергии (рис. 3).

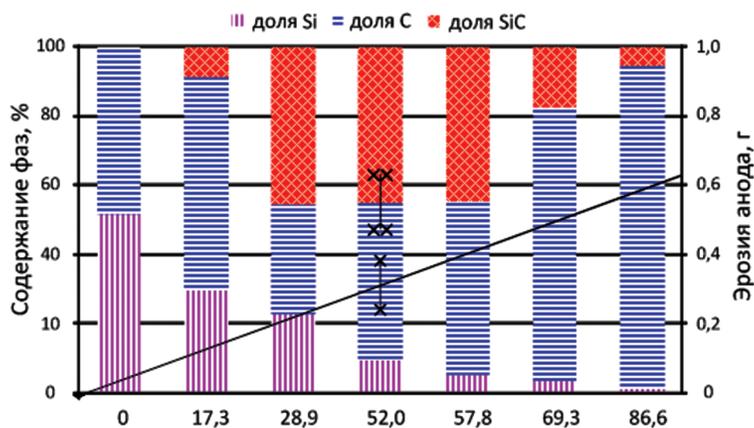


Рис. 3. Зависимость фазового состава продукта синтеза от энергии дугового разряда с наложенной расчетной линией массы эрозии графитового анода

[Fig. 3. Relationship of end-product phase composition to arc discharge energy with a superimposed analytical line of graphite anode mass erosion]

Следует отметить, что образцы, полученные при разной энергии, характеризуются различной массой от 0,3 до 0,8 г, что представляется естественным, так как потери материала на различных этапах производимых манипуляций, особен-

но в процессе горения разряда, неизбежны, и это определяет снижение массы полученного образца относительно массы исходной загрузки при наименьшем уровне энергии дугового разряда; в то же время эрозия анода является причиной существенного увеличения массы образца при наибольшей энергии. Оценка массы эрозии анода произведена по 10 экспериментам, проведенным при различных уровнях энергии дугового разряда. Кроме того, в пределах возможностей используемого оборудования проведено три одинаковых по исходным параметрам эксперимента для оценки возможных отклонений. Согласно полученным экспериментальным данным, масса эрозии анода зависит линейно от энергии дугового разряда с коэффициентом 0,0072 (энергия выражается в кДж, масса — в граммах). На рисунке 3 построена линейная зависимость, на которой отмечено отклонение $\pm\Delta = 0,069$ г (вычисленное по трем экспериментам при среднеквадратичном отклонении $\sigma = 0,04$).

Содержание идентифицированных кристаллических фаз в зависимости от энергии дугового разряда изменяется в отличие от массы эрозии анода нелинейно. Содержание углерода (графита) уменьшается ввиду расхода исходного углерода в процессе синтеза карбида кремния при увеличении энергии от нуля до приблизительно 30 кДж, затем при большем уровне энергии содержание углерода (графита) возрастает вплоть до 90%, что обусловлено эрозией анода. Содержание кремния снижается с ростом энергии на всем исследуемом интервале, что связано одновременно с двумя факторами: 1) расходом исходного кремния в процессе синтеза карбида кремния; 2) добавлением массы эродированного графита в продукт. Соответственно, доля карбида кремния возрастает до ~45% при увеличении энергии от нуля до ~50–60 кДж, затем при дальнейшем увеличении объема подведенной энергии снижается до ~8% одновременно с ростом содержания эродированного графита. Для величины содержания фазы карбида кремния в продукте определены возможные отклонения по серии из шести экспериментов с одинаковыми (в пределах возможных погрешностей используемого оборудования) экспериментами. Так, среднеквадратичное отклонение составило $\sigma = 6,41$, а возможное отклонение $\Delta = 7,85\%$. На рисунке 3 обозначена величина возможного отклонения $\pm\Delta$. Несмотря на существенный разброс результатов и, соответственно, невысокую повторяемость экспериментов, можно судить о наличии обозначенной зависимости фазового состава продукта от подведенной к системе энергии.

Также отметим, что в продуктах, полученных при уровне энергии до ~60 кДж, различий в фазовом составе полученных материалов в зависимости от использования одного из двух типов исходных реагентов не обнаружено. При этом установлено, что при использовании исходной смеси порошкового углерода и кремния, невозможно достичь близкого к нулю содержания исходного кремния (см. рис. 2, дифрактограмма 2) в пределах исследуемого интервала энергий. Однако при использовании исходного углерода в виде волокон установлена возможность получения продукта, состоящего практически на 100% из графитовых фаз и искомого карбида кремния, при стремлении содержания кремния к 0%. Такой результат характерен для эксперимента с достижением уровня энергии ~85 кДж (при токе 165 А) и при использовании в качестве исходных реагентов углеродных волокон и порошкового кремния (см. рис. 2, дифрактограмма 3; рис. 3).

В данной работе не удалось получить однозначный ответ на вопрос, что же позволяет получить более чистый продукт, т.е. практически ликвидировать в его составе исходный кремний именно при использовании исходного реагента в виде смеси углеродных волокон и порошкового кремния. При этом единственным замеченным различием в ходе подготовки и проведения экспериментов является объем, занимаемый смесью исходных реагентов: смесь углеродных волокон и порошкового кремния занимает в полости катода как минимум вдвое больший объем, чем смесь порошковых углерода и кремния. Вероятно, волокнистая структура позволяет на большей поверхности распределить исходные реагенты и одновременно позволяет плазменным переключкам проводить ток по множеству локальных каналов, контактируя практически по всему объему с атомами углерода и кремния [10; 11]. Катодный депозит, образующийся в процессе работы электродуговой установки постоянного тока, в результате переноса массы с графитового анода на катод может существенно влиять на величину достигаемой в плазменном канале температуры и ее распределения, а также на проводимость канала. В ходе проведения экспериментов визуально было установлено, что в случае использования углеродных волокон и порошкового кремния в качестве исходных реагентов катодный депозит в явном виде не образуется, распределяясь равномерно по объему продукта. Возможно, такой режим работы установки и позволяет стабильно подводить к системе энергию на более длительный срок, достаточный для полной переработки исходного кремния.

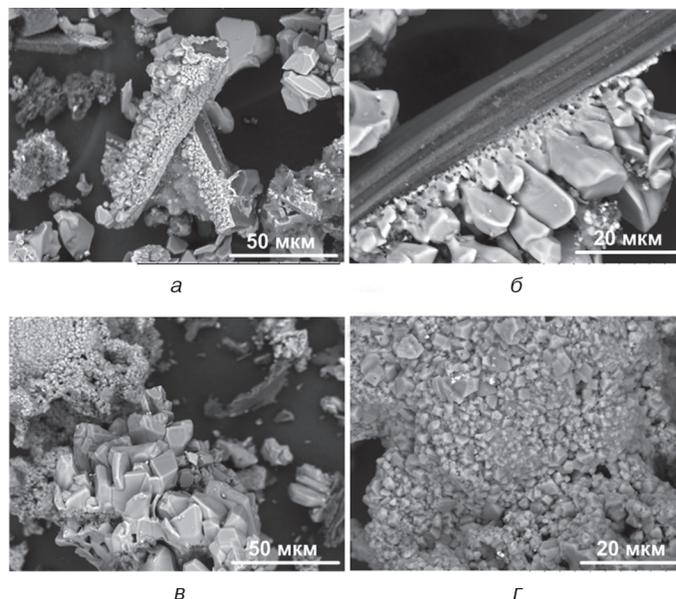


Рис. 4. SEM-снимки продуктов, полученных с использованием углеродных волокон и порошкового кремния (а, б); обоих порошковых реагентов (в, г)
[**Fig. 4.** SEM-pictures of products made of carbon microfibers and silicon powder (a, б) and both carbon and silicon powder reagents (в, г)]

По данным растровой электронной микроскопии (рис. 4), во всех случаях кристаллы карбида кремния имеют типичную для данной фазы форму [12] при размерах от единиц до порядка 10 мкм. Рост карбида кремния идет на поверхности

углеродных волокон, в случае их присутствия в составе исходных реагентов (см. рис. 4, а, б). Этот факт может быть ключевым в отношении вопроса получения продукта, в котором полностью перерабатывается исходный кремний: при достаточной площади (протяженности) углеродного волокна весь исходный кремний распределяется по его поверхности и обрабатывается плазмой более или менее равномерно в занимаемом исходными реагентами объеме; в то же время в случае использования порошковых реагентов (см. рис. 4, в, г) продукт состоит из агломератов кристаллических частиц, в которых, вероятно, могут сохраняться под поверхностью скопления синтезированных частиц SiC остатки непрореагировавшей исходной смеси, в частности кремния.

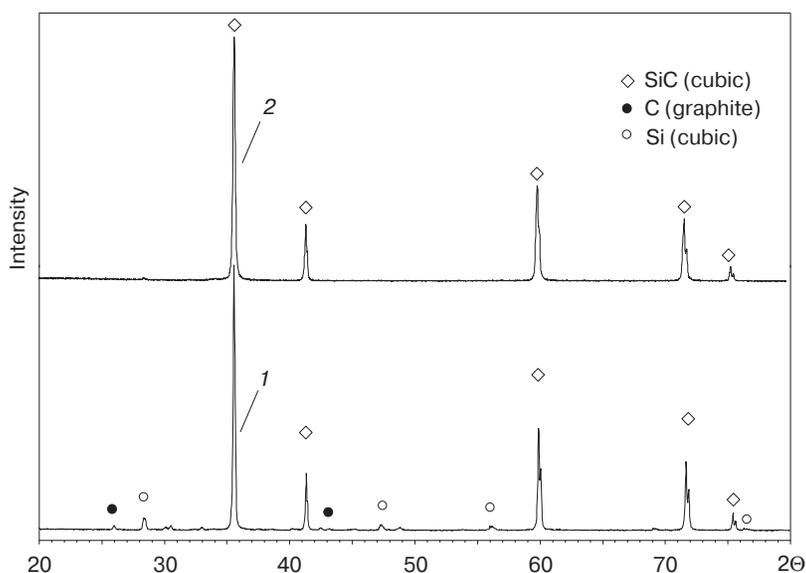


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы порошкового продукта, прогретого в атмосферной печи до 900 °С: 1 — типичная дифрактограмма продукта синтеза, полученного из смеси порошковых углерода и кремния; 2 — типичная дифрактограмма продукта синтеза, полученного из смеси углеродных волокон и порошкового кремния

[**Fig. 5.** X-ray diffraction patterns of powder product heated in atmospheric furnace up to 900 °С: 1 — end-product made of carbon and silicon powders; 2 — end-product made of carbon microfibers and silicon powder]

В целях поиска метода выделения искомой фазы карбида кремния порошковые продукты с наименьшим содержанием кремния помещались в атмосферную печь (марки ЭКСП — 10), где нагревались в воздушной среде до 900 °С со скоростью нагрева 25 °С/мин. В качестве подложек использовалась корундовая посуда площадью около 6 см² (отдельная для каждого образца), по поверхности которой равномерно распределялся продукт тонким слоем около 1 мм. Указанная температура выдерживалась 30 мин., затем печь отключалась от сети электроснабжения, и продукт остывал естественным образом. Как видно на типичных картинах рентгеновской дифракции (см. рис. 5), в случае использования в качестве исходных реагентов углеродных волокон и порошкового кремния (см. рис. 5, дифрактограмма 2) после нагрева в продукте присутствует практически только одна фаза —

карбид кремния с содержанием не менее 99% согласно количественному анализу. В то же время на картине дифракции продукта синтеза, полученного из порошковых углерода и кремния (см. рис. 5, дифрактограмма 1), идентифицируются в том числе дифракционные максимумы, не соответствующие фазе карбида кремния. Данные дифракционные максимумы с малой интенсивностью могут принадлежать графиту, кремнию и его оксиду, образовавшемуся в процессе нагрева продукта в атмосферной печи. Исходные реагенты в виде кремния и углерода, по всей видимости, могут сохраняться в теле агломератов под их поверхностью, состоящей из кристаллов карбида кремния.

Таким образом, по совокупности представленных данных можно заключить, что в настоящей работе определена зависимость фазового состава продукта, полученного в плазме дугового разряда постоянного тока, инициированного в воздушной среде в присутствии углерода и кремния. Несмотря на значительные отклонения в составе продукта и, соответственно, низкую повторяемость экспериментов, удалось определить оптимальные параметры процесса синтеза с точки зрения получения продукта с наименьшим числом примесных фаз: при рабочем токе 165 А, подведенной энергии свыше 85 кДж удалось практически полностью переработать исходный кремний и получить продукт, состоящий из искомого карбида кремния и графита. При этом последующие эксперименты по нагреву полученных порошковых материалов в воздушной среде позволили выделить из состава продуктов практически чистый (свыше 99%) карбид кремния. По всей видимости, выделенный из состава продукта карбид кремния и разрабатываемый метод следует применять в области получения абразивных материалов ввиду сложности получения материалов более высокой степени чистоты, т.е. в электронной промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Андриевский П.А. Наноразмерный карбид кремния: синтез, структура и свойства // Успехи химии. 2009. № 78. С. 889–900.
- [2] Wu R., Zhou K., Yue C.Y., Wei J., Pan Y. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials // Progr. Mater.Sci. 2015. Vol. 72. P. 1–110.
- [3] Zhang Y. et al. Chemical Physics Letters. 2017. Vol. 678. P. 17–22.
- [4] Yanjie Su, Yafei Zhang. Carbon nanomaterials synthesized by arc discharge hot plasma // Carbon. 2015. Vol. 83. P. 90–99.
- [5] Jieshan Qiu, Yongfeng Li, Yunpeng Wang, Zongbin Zhao, Ying Zhou, Yanguo Wang. Synthesis of carbon-encapsulated nickel nanocrystals by arc-discharge of coal-based carbons in water // Fuel. 2004. Vol. 83. P. 615–617.
- [6] Jiang Zhao, Yanjie Su, Zhi Yang, Liangming Wei, Ying Wang, Yafei Zhang. Arc synthesis of double-walled carbon nanotubes in low pressure air and their superior field emission properties // Carbon. 2013. Vol. 58. P. 92–98.
- [7] Yanjie Su, Hao Wei, Tongtong Li, Huijuan Geng, Yafei Zhang. Low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by low-pressure air arc discharge // Materials Research Bulletin. 2014. P. 23–24.
- [8] Kimoto T. Bulk and epitaxial growth of silicon carbide // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. 2016. Vol. 62. Iss. 2. P. 329–351.
- [9] Arora N., Sharma N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review // Diamond & Related Mater. 2014. Vol. 50. P. 135–50.

- [10] Yao-Wen Yeh, Yevgeny Raitses, Nan Yao. Structural variations of the cathode deposit in the carbon arc // Carbon. 2016. Vol. 105. P. 490—495.
- [11] Ng J., Raitses Y. Role of the cathode deposit in the carbon arc for the synthesis of nanomaterials // Carbon. 2014. Vol. 77. P. 80—88.
- [12] Eom J.-H. et al. Effects of the initial α -SiC content on the microstructure, mechanical properties, and permeability of macroporous silicon carbide ceramics // Journal of the European Ceramic Society. 2012. Vol. 32. Iss. 6. P. 1283—1290.

© Пак А.Я., Мамонтов Г.Я., Болотникова О.А., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 05 марта 2018

Дата принятия к печати: 30 апреля 2018

Работа выполнена в рамках проекта повышения конкурентоспособности ведущих российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Для цитирования:

Пак А.Я., Мамонтов Г.Я., Болотникова О.А. Влияние энергии на фазовый состав продукта безвакуумного электродугового синтеза кубического карбида кремния // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 2. С. 165—176. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-165-176

Сведения об авторах:

Пак Александр Яковлевич — кандидат технических наук, доцент отделения автоматизации и робототехники инженерной школы информационных технологий и робототехники, Томский политехнический университет. *Область научных интересов:* порошковые материалы, карбиды, углеродные материалы, электроразрядные методы синтеза, фазовые превращения. *Контактная информация:* e-mail: ayapak@tpu.ru

Мамонтов Геннадий Яковлевич — доктор физико-математических наук, профессор отделения автоматизации и робототехники инженерной школы информационных технологий и робототехники, Томский политехнический университет. *Область научных интересов:* термодинамика, математическая статистика, высокотемпературные процессы, быстропротекающие процессы. *Контактная информация:* e-mail: gmamontov@tpu.ru

Болотникова Ольга Александровна — студентка отделения электроэнергетики и электротехники, Томский политехнический университет. *Область научных интересов:* карбид кремния, электроразрядные методы синтеза. *Контактная информация:* e-mail: bolotnikovaoa@gmail.com

INFLUENCE OF ENERGY ON PHASE COMPOSITION OF END-PRODUCT OBTAINED BY VACUUM-FREE ELECTRIC ARC SYNTHESIS OF CUBIC SILICON CARBIDE

A.Ya. Pak , G.Ya. Mamontov, O.A. Bolotnikova

Tomsk Polytechnic University
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract. The paper describes the scientific and technical basis of the vacuum-free plasma method for obtaining silicon carbide realized by DC arc discharge between graphite electrodes. In a series of experiments the energy supplied to the system was changed by increasing the duration of arc discharge with the constant value of current intensity (165 A); two precursor types were used: a mixture of silicon powder with X-ray amorphous carbon in the microfiber form in the first case and with carbon powder in the second case; the mass ratio in the initial mixture was Si:C = 2:1. As a result of the evaluation of the synthesis product quantitative composition, the experimental parameters that allow to achieve the maximum content of the target silicon carbide phase (up to 45%) are determined. Moreover, it was possible to determine the parameters when the only impurity phase in the product was graphite; as a result, the purification of the product from unbound carbon and thereby obtaining silicon carbide with ~99% content was successfully performed by atmospheric furnace heating at a temperature of 900 °C. This result is ensured by two factors: the presence of carbon fibers in the initial reagents mixture and a sufficient level of the supplied energy of about 216 kJ/g.

Key words: silicon carbide, vacuum-free method, electric arc synthesis, precursor influence, X-ray diffractometry, electron microscopy

REFERENCES

- [1] Andrievskii R.A. Nanorazmernyi karbid kremniya: sintez, struktura i svoitva [Nanosize silicon carbide: synthesis, structure and properties]. *Uspekhi Khimii* [Russian Chemical Reviews]. 2009. No. 78. P. 889–900. (in Russ.)
- [2] Wu R., Zhou K., Yue C.Y., Wei J., Pan Y. Recent progress in synthesis, properties and potential applications of SiC nanomaterials. *Progr. Mater.Sci.* 2015. Vol. 72. P. 1–110.
- [3] Zhang Y. et al. *Chemical Physics Letters*. 2017. Vol. 678. P. 17–22.
- [4] Yanjie Su, Yafei Zhang. Carbon nanomaterials synthesized by arc discharge hot plasma. *Carbon*. 2015. Vol. 83. P. 90–99.
- [5] Jieshan Qiu, Yongfeng Li, Yunpeng Wang, Zongbin Zhao, Ying Zhou, Yanguo Wang. Synthesis of carbon-encapsulated nickel nanocrystals by arc-discharge of coal-based carbons in water. *Fuel*. 2004. Vol. 83. P. 615–617.
- [6] Jiang Zhao, Yanjie Su, Zhi Yang, Liangming Wei, Ying Wang, Yafei Zhang. Arc synthesis of double-walled carbon nanotubes in low pressure air and their superior field emission properties. *Carbon*. 2013. Vol. 58. P. 92–98.
- [7] Yanjie Su, Hao Wei, Tongtong Li, Huijuan Geng, Yafei Zhang. Low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by low-pressure air arc discharge. *Materials Research Bulletin*. 2014. P. 23–24.
- [8] Kimoto T. Bulk and epitaxial growth of silicon carbide. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2016. Vol. 62. P. 329–351.
- [9] Arora N., Sharma N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review // *Diamond & Related Mater.* 2014. Vol. 50. P. 135–50.
- [10] Yao-Wen Yeh, Yevgeny Raitses, Nan Yao. Structural variations of the cathode deposit in the carbon arc. *Carbon*. 2016. Vol. 105. P. 490–495.

- [11] Ng J., Raitses Y. Role of the cathode deposit in the carbon arc for the synthesis of nanomaterials. *Carbon*. 2014. Vol. 77. P. 80—88.
- [12] Eom J.-H. et al. Effects of the initial α -SiC content on the microstructure, mechanical properties, and permeability of macroporous silicon carbide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2012. Vol. 32. P. 1283—1290.

Article history:

Received: March 05, 2018

Accepted: April 30, 2018

The research was conducted in terms of the programme of improving academic status of Russian universities among the leading educational centres in the world.

For citation:

Pak A. Ya., Mamontov G. Ya., Bolotnikova O. A. (2018). Influence of energy on phase composition of end-product obtained by vacuum-free electric arc synthesis of cubic silicon carbide. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 165—176. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-165-176

Bio Note:

Aleksandr Y. Pak — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the automation and robotics department of the information technology and robotics engineering school, Tomsk Polytechnic University. *Research interests:* powder materials, carbides, carbon materials, electric-discharge methods of synthesis, phase transformations. *Contact information:* e-mail: ayapak@tpu.ru

Gennadii Ya. Mamontov — Doctor of Physics and Mathematics, Professor of automation and robotics department of the information technology and engineering school, Tomsk Polytechnic University. *Research interests:* thermodynamics, mathematical statistics, high-temperature processes, fast processes. *Contact information:* e-mail: gmamontov@tpu.ru

Ol'ga A. Bolotnikova — student of electric power and electrical engineering department, Tomsk Polytechnic University. *Research interests:* silicon carbide, electric discharge methods of synthesis. *Contact information:* e-mail: bolotnikovaoa@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-177-189

УДК 62-50, 519-714

БИБЛИОТЕКА PYTHON ДЛЯ СИНТЕЗА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А.И. Дивеев^{1,2}, А.В. Доценко²

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»,
Российская академия наук

Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, 44

² Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

Статья посвящена описанию библиотеки программ на языке Python для решения задач синтеза систем управления методами символьной регрессии. Задача синтеза становится все более актуальной, приобретая особое значение ввиду стремительного развития робототехники. Как правило, инженеры и просто практики используют регуляторы шаблонного типа при моделировании, а затем подбирают под них параметры. В условиях, когда вычислительная мощность персональных компьютеров достигла своего апогея, а языки программирования стали чрезвычайно выразительны за счет высокого уровня абстрактности и обширности библиотек, целесообразнее реализовать синтез в виде пакета. В качестве языка для реализации синтеза был выбран Python. По мнению авторов статьи, Python является удобным языком для программирования матричных и векторных вычислений благодаря пакету numpy. Более того, доля проектов, написанных на Python, в веб-сервисе для хостинга Github за последнее время неизменно растет, что говорит о поддержке языка со стороны сообщества разработчиков. В данной статье представлено описание применения библиотеки для решения задачи синтеза управления. Приведено описание метода символьной регрессии, метода сетевого оператора и алгоритмов поиска оптимального решения с использованием принципа малых вариаций базисного решения. Рассмотрен пример использования библиотеки для решения задачи синтеза управления мобильным роботом, движущимся на плоскости, в условиях препятствий.

Ключевые слова: синтез управления, библиотека Python, метод символьной регрессии, оптимальное управление, мобильный робот

ВВЕДЕНИЕ

Применение методов символьной регрессии для решения задачи синтеза управления в последнее время становится наиболее популярным из-за быстрого развития вычислительной техники. Для применения методов символьной регрессии необходимо создание специального программного обеспечения, которое должно включать функции кодирования и декодирования математических выражений тем или иным методом символьной регрессии, эволюционные алгоритмы поиска оптимального решения, функции для моделирования объекта управления и др. Несмотря на то, что разработанные программные продукты для решения задачи синтеза системы управления методом символьной регрессии создаются уже в

течение последних десяти лет, универсальная библиотека, которая могла бы быть использована широким кругом пользователей, до сих пор отсутствует.

Язык программирования Python в настоящий момент имеет исключительную популярность и причисляется к языкам искусственного интеллекта или приравнивается к математическим пакетам. Скорее всего, это вызвано не особой лексикой языка или дополнительными операторами, или типам данных, а наличием большого количества библиотек, практически по всем актуальным вычислительным направлениям. Особую популярность приобрел Python у специалистов в области искусственных нейронных сетей. Процесс обучения искусственной нейронной сети методом обратного распространения ошибки доведен в библиотеках Python до утилитарного состояния, когда пользователь уже может использовать искусственную нейронную сеть для решения своих задач, особо не вникая в технологию обучения и теорию искусственных нейронных сетей. Приблизительно так же мы используем функции математических пакетов типа MatLab, например, при вычислении корней полиномов или решения систем дифференциальных уравнений. Одной из целей создания библиотеки Python является расширение круга пользователей, особенно прикладников, занимающихся разработкой систем автоматического управления сложными объектами или, в частности, робототехническими устройствами.

ЗАДАЧА СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ

Задача синтеза представляет собой задачу, решение которой в общем случае должно привести к нахождению математического выражения, описывающего функционирование системы управления. Заметим, что системы искусственного интеллекта — это системы управления некоторыми объектами. В этом случае задача синтеза управления является общей задачей, при решении которой иногда требуется создание систем искусственного интеллекта.

В задаче синтеза управления [1] предполагается, что известна математическая модель объекта управления. В общем случае модель объекта управления описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где \mathbf{x} — вектор состояния объекта управления; \mathbf{u} — вектор управления; $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_n]^T$, $\mathbf{u} = [u_1 \dots u_m]^T$; $m \leq n$.

Компоненты вектора управления ограничены

$$u_i^- \leq u_i \leq u_i^+, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где u_i^- , u_i^+ — заданные величины; $i = \overline{1, m}$.

Для системы (1) задана область начальных значений

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0 \in X_0. \quad (3)$$

Заданы терминальные условия как цель управления

$$\varphi_i(\mathbf{x}(t_f)) = 0, i = \overline{1, r}, r \leq n, \quad (4)$$

где t_f — время окончания процесса управления, может быть строго заданным или в общем случае ограниченным и определяемым в процессе решения задачи, например, по достижении терминального многообразия (4)

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } \|\varphi(\mathbf{x}(t))\| \leq \varepsilon \text{ и } t < t^+ \\ t^+ & \text{— иначе} \end{cases}, \quad (5)$$

где t^+ — предельное время процесса управления; ε — малая положительная величина; $\varphi(\mathbf{x}(t)) = [\varphi_1(\mathbf{x}(t)) \dots \varphi_r(\mathbf{x}(t))]^T$,

$$\|\varphi(\mathbf{x}(t))\| = \sqrt{\sum_{i=1}^r \varphi_i^2(\mathbf{x}(t))}.$$

Задан критерий качества управления

$$J = F(\mathbf{x}(t_f)) + \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \rightarrow \min. \quad (6)$$

Необходимо найти управление в виде функции от координат пространства состояний

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}). \quad (7)$$

Функция (7) удовлетворяет ограничениям (2) и обеспечивает нахождение такого управления, при котором любое частное решение системы (1) с функцией (7) в правой части вместо вектора управления с начальными условиями из области (3) достигает терминального многообразия за допустимое время (5) с оптимальным значением критерия качества (6).

МЕТОД СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА

Метод сетевого оператора разработан в 2006 г. профессором А.И. Дивеевым специально для решения задачи синтеза управления [2; 3]. Метод использует кодирование математического выражения в виде ориентированного графа, который представляется в компьютере целочисленной матрицей сетевого оператора. Например, математическое выражение

$$y = \ln(q_1)x_1^2 + q_2x_2^2$$

с набором элементарных функций $\rho_1(z) = z$, $\rho_2(z) = z^2$, $\rho_3(z) = \ln(z)$, $\chi_1(z_1, z_2) = z_1 + z_2$, $\chi_2(z_1, z_2) = z_1z_2$ кодируется целочисленной матрицей следующего вида:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

и графом, представленным на рис. 1.

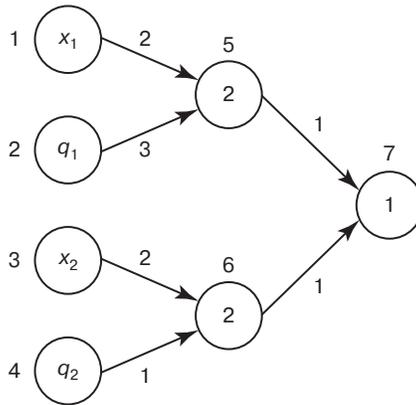


Рис. 1. Граф сетевого оператора
[**Fig. 1.** Network operator graph]

На рисунке 1 рядом с узлами размещены их номера, которые соответствуют номерам строк матрицы сетевого оператора.

Недостатком матрицы сетевого оператора является большое количество не используемых при вычислении ее элементов. В любой матрице сетевого оператора всегда рассматриваются только наддиагональные элементы, а из них в вычислении участвуют только не нулевые элементы.

Для более экономного представления графа сетевого оператора в памяти компьютера используем упорядоченные множества, которые на языке Python описываются встроенным типом list [4]. Сетевой оператор на основе списков представляется в следующем виде:

$$R = (G_1, \dots, G_M), \quad (9)$$

где G_i — список операндов бинарной операции в узле $i + N_0$; N_0 — количество узлов источников в графе сетевого оператора.

Список операндов представляет собой множество упорядоченных пар чисел

$$G_i = ((\alpha_1^i, \beta_1^i), \dots, (\alpha_{K_i}^i, \beta_{K_i}^i), (i + N_0, \psi_{i + N_0, i + N_0})), \quad (10)$$

где α_j^i — номер узла, из которого выходит дуга, входящая в узел $i + N_0$; β_j^i — номер унарной операции, связанной с дугой, соединяющей узел α_j^i и $i + N_0$; $\psi_{i + N_0, i + N_0}$ —

номер бинарной операции, связанной с узлом $i + N_0$, или диагональный элемент матрицы сетевого оператора, находящийся в строке $i + N_0$.

Заметим, что по правилам построения сетевого оператора все бинарные операции являются коммутативными и ассоциативными, поэтому они могут иметь более двух операндов и выполнять операции над ними в любой последовательности.

Определение 1. Представление сетевого оператора в виде вложенных списков называем **реестром (register) сетевого оператора**.

Рассмотрим граф математического выражения, приведенный на рис. 1. На графе имеем четыре узла источника, $N_0 = 4$. Рассмотрим узел $5 = N_0 + 1$. В узел входят две дуги из узлов источников 1 и 2, поэтому $\alpha_1^1 = 1, \alpha_2^1 = 2$. Дуга, выходящая из узла 1, связана с унарной операцией 2, а дуга, выходящая из узла 2, связана с унарной операцией 3, поэтому $\beta_1^1 = 2, \beta_2^1 = 3$. Сам узел 5 связан с бинарной операцией 2, $\psi_{5,5} = 2$. Первый список операндов имеет вид

$$G_1 = ((1,2), (2,3), (5,2)).$$

Определяем список операндов для узлов 6 и 7. В результате получаем следующий реестр сетевого оператора:

$$R = (((1,2), (2,3), (5,2)), ((3,2), (4,1), (6,2)), ((5,1), (6,1), (7,1))).$$

Для вычисления математического выражения по реестру сетевого оператора необходимо располагать упорядоченным множеством аргументов математического выражения

$$A = (a_1, \dots, a_{N_0}), \quad (11)$$

где a_j — аргумент математического выражения, который в сетевом операторе является либо параметром, либо переменной, $a_N \in \{q_1, \dots, q_p, x_1, \dots, x_n\}, j = \overline{1, N_0}$.

Для множества аргументов математического выражения необходимо также знать номера узлов источников, с которыми связаны аргументы математического выражения

$$I_0 = (l_1, \dots, l_{N_0}). \quad (12)$$

Задаем вектор для хранения промежуточных вычислений. Размерность вектора равна количеству списков реестра сетевого оператора

$$z = [z_1 \dots z_M]^T. \quad (13)$$

Для каждого списка вычисляем значение вектора (12)

$$z_i = \begin{cases} \rho_{\beta_i^i}(s_i^i), & \text{если } k_i = 1 \\ \chi_{\psi_{i+N_0, i+N_0}}(\rho_{\beta_1^i}(s_1^i), \dots, \rho_{\beta_{k_i}^i}(s_{k_i}^i)) & \text{— иначе,} \end{cases} \quad (14)$$

где

$$s_j^i = \begin{cases} a_{I\alpha_j^i}, & \text{если } \alpha_j^i \leq N_0 \\ z_{\alpha_j^i - N_0} & \text{— иначе} \end{cases}, \quad j = \overline{1, k_i}. \quad (15)$$

Для рассматриваемого примера получаем: $N_0 = 4$, $A = (q_1, q_2, x_1, x_2)$, $I_0 = (2, 4, 1, 3)$, $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T$,

$$z_1 = \rho_2(x_1)\rho_3(q_1) = x_1^2 \ln(q_1),$$

$$z_2 = \rho_2(x_2)\rho_1(q_2) = x_2^2 q_2,$$

$$z_3 = \rho_1(z_1) + \rho_1(z_2) = x_1^2 \ln(q_1) + x_2^2 q_2.$$

Для поиска оптимального сетевого оператора используем принцип малых вариаций базисного решения [5]. В качестве малых вариаций используем те же вариации, что и для матрицы сетевого оператора [2]: замену унарной операции, замену бинарной операции, вставку унарной операции в список, удаление унарной операции из списка, если при этом в списке остается еще не менее двух элементов. Дополнительно используем вариацию замены компоненты вектора параметров. Все генетические операции скрещивания и мутации выполняем на множествах векторов, описывающих малые вариации сетевого оператора.

БИБЛИОТЕКА РУТНОН ДЛЯ СИНТЕЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ СЕТЕВОГО ОПЕРАТОРА

Библиотека состоит из трех классов, содержащих методы и поля для решения задачи синтеза управления методом символьной регрессии:

1. Base Genetics
2. Network Operator
3. Structure Genetics

Класс Base Genetics предназначен для проведения параметрической оптимизации. При инициализации объекта класса Base Genetics имеется возможность передать объекту вектор, наличие которого означает, что компоненты передаваемого вектора будут являться математическими ожиданиями для нормального распределения, из которого будут генерироваться значения компоненты индивидов популяции. В случае отсутствия данного вектора популяция генерируется согласно равномерному распределению.

Класс Network Operator предназначен для хранения базисной структуры и базисного вектора параметров, а также для отображения структуры в выходной вещественный вектор. При инициализации объекта класса Network Operator на вход объекту необходимо передать:

- 1) список унарных функций;
- 2) список бинарных функций;

- 3) список номеров входных узлов;
- 4) список номеров выходных узлов.

Класс *Structure Genetics* предназначен для проведения структурно-параметрической оптимизации. При инициализации объекта класса *Structure Genetics* на вход объекту необходимо подать объект типа *Network Operator* и объект-модель. Объект-модель не входит в библиотеку и должна быть реализована отдельно в виде класса, который имел бы интерфейс, согласно которому объект-модель реализовывал численное интегрирование дифференциальных уравнений, жестко запрограммированных в классе. Чтобы объект-модель могла быть интегрирована с объектом класса *Network Operator*, необходимо, чтобы в ней была реализована функция *set_control_function*, принимающая на вход объект функции и присваивающая данную функцию внутренней переменной.

Семантика кодируемой структуры

Для кодирования математического выражения использовались стандартные типы языка Python — список (*list*) и кортеж (*tuple*) [4]. Одно математическое выражение представляется в виде списка, состоящего из других списков, количество которых фиксировано базисным решением. Каждый из подсписков состоит минимум из трех кортежей, длина которых равна двум. Первая позиция кортежа — это номер узла, вторая позиция — это номер операции. Если кортеж является последним в подсписке (далее диагональный), то операция является бинарной, иначе — унарной. Таким образом, чтобы структура графа математического выражения была неразрывной и ациклической (ссылка на методичку по сетевому оператору), необходимо, чтобы одновременно выполнялись два условия:

- 1) кортежи подсписка должны содержать только входные узлы либо узлы диагональных кортежей предыдущих подсписков;
- 2) каждый элемент из множества входных и диагональных узлов должен быть использован в качестве узла, над которым проводится унарная операция, минимум один раз.

Структура вариаций базисного решения

В классе *Structure Genetics* предусмотрено пять типов вариаций:

- 0: Замена бинарной операции
- 1: Замена унарной операции
- 2: Добавление унарной операции
- 3: Удаление унарной операции
- 4: Изменение параметра

Каждый индивид популяции объекта типа *Structure Genetics* представляет собой матрицу $n \times 4$, где n — число вариаций. При скрещивании двух родителей образуется пул из всех вариаций обоих родителей. К этому пулу добавляются новые вариации четвертого типа. Далее для каждого ребенка из общего пула вариаций случайно выбирается n вариаций, причем одна вариация не может быть выбрана более одного раза.

Начальная популяция генерируется при помощи стандартного типа *dict*. Таким образом, достигается большая разнообразность, так как каждый индивид имеет уникальное значение функционала, не превышающее некоторой заданной границы.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИБЛИОТЕКИ ДЛЯ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ

Библиотека была протестирована на гусеничном мобильном роботе, модель которого имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= 0,5(u_1 + u_2)\cos(\theta), \\ \dot{y} &= 0,5(u_1 + u_2)\sin(\theta), \\ \dot{\theta} &= 0,5(u_1 - u_2).\end{aligned}\tag{16}$$

На рисунке 2 представлен примерный вид мобильного робота.



Рис. 2. Мобильный робот
[Fig. 2. Mobile robot]

Для системы (16) заданы начальные условия: $x(0) = 10$, $y(0) = 10$, $\theta(0) = 0$.
Управление объектом ограничено

$$-10 \leq u_i \leq 10, i = 1, 2.\tag{17}$$

Заданы терминальные условия

$$x_f = 10, y_f = 10, \theta_f = 0.\tag{18}$$

Заданы фазовые ограничения

$$r^* - \sqrt{(x^* - x)^2 + (y^* - y)^2} \leq 0,\tag{19}$$

где $r^* = 2,5$, $x^* = 5$, $y^* = 5$.

Задан критерий качества

$$J = t_f + \sqrt{(x_f - x(t_f))^2 + (y_f - y(t_f))^2} + \int_0^{t_f} \vartheta \left(r^* - \sqrt{(x^* - x)^2 + (y^* - y)^2} \right) dt \rightarrow \min, \quad (20)$$

где t_f — время окончания процесса управления;

$$t_f = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \sqrt{(x_f - x(t_f))^2 + (y_f - y(t_f))^2} < \varepsilon, \\ t^+ & \text{— иначе} \end{cases}, \quad (21)$$

где $t^+ = 2,5$ с, $\varepsilon = 0,01$, $J(a)$ — функция Хевисайда,

$$\vartheta(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } a > 0 \\ 0 & \text{— иначе} \end{cases}.$$

Необходимо найти функцию управления в виде (7), чтобы она удовлетворяла ограничениям (17) и обеспечивала достижение объектом терминального состояния (18) с оптимальным значением критерия качества (20). Для решения задачи используем метод сетевого оператора и реализацию метода с помощью классов Python библиотеки.

Определим множество аргументов (10) искомой функции управления

$$A = (q_1, q_2, q_3, x, y, \theta), I_0 = (2, 4, 6, 1, 3, 5).$$

Определим базисное решение в форме линейной обратной связи по координатам вектора пространства состояний

$$u_i = q_1 x + q_2 y + q_3 \theta, i = 1, 2,$$

где $q_i = 1, i = 1, 2, 3$.

Закодированное в форме реестра сетевого оператора базисное решение имеет вид

$$R = (((1,1), (2,1), (6,2)), ((3,1), (4,1), (7,2)), ((5,1), (6,1), (8,2)), ((6,1), (7,1), (8,1), (9,1)), ((6,1), (7,1), (8,1), (10,1))).$$

Было проведено несколько десятков экспериментов. Три наилучших найденных решения имели следующий вид.

Решение 1

$$u_1 = q_1 + \sin(q_2 y \arctg(q_2)) + q_2 \theta x + \ln(x), \quad (22)$$

$$u_2 = \min\{\max(q_2, x), -q_2 y \arctg(q_2), \cos(x)\}, \quad (23)$$

где $q_1 = -3,15283$, $q_2 = 9,942394$, $q_3 = -7,374617$.

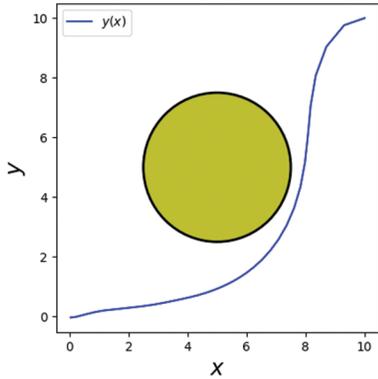


Рис. 3. Траектория движения робота на плоскости для решения (22), (23)
[Fig. 3. The robot's trajectory on the plane for the solution (22), (23)]

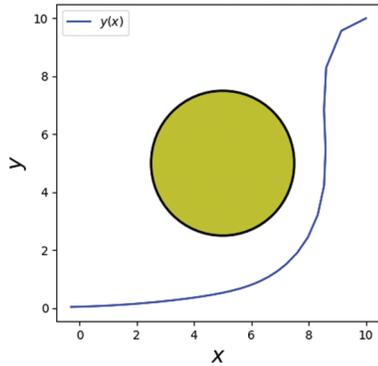


Рис. 4. Траектория движения робота на плоскости для решения (24), (25)
[Fig. 4. The robot's trajectory on the plane for the solution (24), (25)]

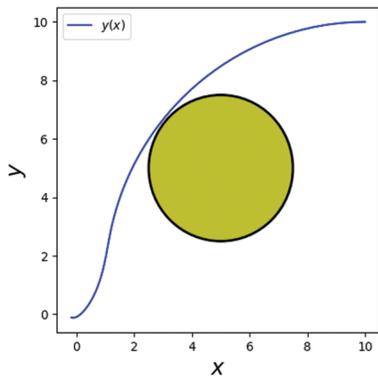


Рис. 5. Траектория движения робота на плоскости для решения (26), (27)
[Fig. 5. The robot's trajectory on the plane for the solution (26), (27)]

Для решения (22), (23) функционал имел значение: $J = 2,381070$. Результаты моделирования с решением (22), (23) приведены на рис. 3.

Решение 2

$$u_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} \ln(q_1), \operatorname{arctg}(q_2), 1 + q_3 \theta(-x) + \\ + \operatorname{sgn}(q_2 y \ln(q_3)) \sqrt{|q_2 y \ln(q_3)|} \end{array} \right\}, \quad (24)$$

$$u_2 = \min \{ \ln(q_1), \operatorname{arctg}(q_2), 1 + q_2 y \ln(q_3) \}, \quad (25)$$

где $q_1 = 1,340758$, $q_2 = 8,966063$, $q_3 = 9,291124$.

Для решения (24), (25) функционал имел значение: $J = 2,354040$. Результаты моделирования с решением (24), (25) приведены на рис. 4.

Решение 3

$$u_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} \exp(\max \{ \ln(q_1), x, \cos(q_1) \}), \\ q_2 y, \cos(q_3) \theta_3^3(-q_3), \\ \operatorname{sgn}(q_3) \sqrt{|q_3|}, \sin(q_1) \end{array} \right\}, \quad (26)$$

$$u_2 = q_2 + y, \quad (27)$$

где $q_1 = -13,161914$, $q_2 = 4,006537$, $q_3 = 8,425214$.

Для решения (26), (27) функционал имел значение: $J = 2,400259$. Результаты моделирования с решением (26), (27) приведены на рис. 5.

ВЫВОДЫ

Описанная в статье Python библиотека классов позволяет решать задачи структурного синтеза, применяя при этом новую, экономную структуру кодирования формулы. Новая структура, названная реестром сетевого оператора, в отличие от матрицы сетевого оператора не включает нулевых элементов, не участвующих в вычислении математического выражения. Проведен вычислительный эксперимент по решению задачи синтеза управления мобильным

роботом, движущимся по плоскости при наличии фазовых ограничений. Результаты моделирования полученных при синтезе различных систем управления показали, что найденная функция управления обеспечивает достижение объектом терминального состояния с близким к оптимальному значению функционала без нарушения фазовых ограничений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Дивеев А.И.* Приближенные методы решения задачи синтеза оптимального управления. М.: ВЦ РАН, 2015. 184 с.
- [2] *Дивеев А.И.* Метод сетевого оператора. М.: ВЦ РАН, 2010. 178 с.
- [3] *Дивеев А.И.* Численный метод сетевого оператора для синтеза системы управления с неопределенными начальными значениями // Известия РАН Теория и системы управления. 2012. № 2. С. 63–78.
- [4] Python 3.5.5 documentation // www.python.org URL: <https://docs.python.org/3.5/tutorial/introduction.html#lists> (дата обращения: февраль 2018).
- [5] *Diveev A.I.* Small Variations of Basic Solution Method for Non-numerical Optimization // Proceedings of 16th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization, CAO' 2015. October 6th–9th 2015 Garmisch-Partenkirchen. P. 28–33.

© Дивеев А.И., Доценко А.В., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 01 марта 2018

Дата принятия к печати: 10 мая 2018

Для цитирования:

Дивеев А.И., Доценко А.В. Библиотека Python для синтеза интеллектуальных систем управления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 2. С. 177–189. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-177-189

Сведения об авторах:

Дивеев Асхат Ибрагимович — доктор технических наук, профессор, заведующий сектором проблем кибернетики, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление», Российская академия наук, профессор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* вычислительные методы для решения задач управления. *Контактная информация:* e-mail: aidiveev@mail.ru

Доценко Антон Викторович — аспирант департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* методы оптимизации, эволюционные алгоритмы, искусственные нейронные сети, машинное обучение, вычислительные методы решения задач оптимального управления. *Контактная информация:* e-mail: anton.dozenko@gmail.com

PYTHON PACKAGE FOR INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS SYNTHESIS

A.I. Diveev^{1,2}, A.V. Dotsenko²

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

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

Abstract. This article is devoted to the description of a python library based on symbolic regression methods for control systems synthesis problem. Control synthesis is becoming more and more relevant, gaining particular importance in view of the rapid development of robotics. Usually, practitioners and engineers apply template-type regulators when modeling, and then select optimal parameters for them. At a time when the computing power of PC's has reached its peak, and programming languages have become extremely expressive due to the high level of abstraction and the vastness of libraries, it is better to implement the synthesis in the form of a library. Python was chosen as the language for synthesis implementation. According to the authors of the article, Python is a convenient language for programming matrix and vector calculations thanks to the numpy package. Moreover, the share of projects written in Python in the web service for hosting Github has been steadily increasing recently, which indicates the support of the language from the developer community. This article describes how to use the package to solve the problem of control synthesis. The authors provide the description of the symbolic regression method, the network operator and algorithms for finding the optimal solution using the principle of small variations of the basic solution. In the experimental part of the article, an example of how to use the library to solve the problem of synthesis of control of a mobile robot moving on a plane with obstacles is considered.

Key words: control synthesis, python library, symbolic regression method, optimal control, mobile robot

REFERENCES

- [1] Diveev A.I. Priblizhennyye metody resheniya zadachi sinteza optimal'nogo upravleniya [Approximate methods for solving the optimal control synthesis problem]. Moscow: Dorodnicyn Computing Centre of RAS Publ., 2015. 184 p. (In Russ.)
- [2] Diveev A.I. Metod setevogo operatora [Network operator]. Moscow: Dorodnicyn Computing Centre of RAS Publ., 2010. 178 p. (In Russ.)
- [3] Diveev A.I. Chislennyi metod setevogo operatora dlya sinteza sistemy upravleniya s neopredelennymi nachal'nymi znacheniyami [Network operator numerical method for the control system synthesis with undefined initial values]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2012. (2). P. 63–78. (In Russ.)
- [4] Python 3.5.5 documentation // www.python.org URL: <https://docs.python.org/3.5/tutorial/introduction.html#lists> (access date: February 2018).
- [5] Diveev A.I. Small Variations of Basic Solution Method for Non-numerical Optimization // Proceedings of 16th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization, CAO' 2015. October 6th–9th 2015 Garmisch-Partenkirchen. P. 28–33.

Article history:

Received: March 01, 2018

Accepted: May 10, 2018

For citation:

Diveev A.I., Dotsenko A.V. (2018). Python package for intelligent control systems synthesis. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 177–189. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-177-189

Bio Note:

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

Anton V. Dotsenko — post-graduate student of Department of Mechanics and Mechatronics, Engineering Academy, Peoples’ Friendship University of Russia. *Research interests:* Optimization algorithms, evolutionary algorithms, artificial neural networks, machine learning, computational methods for problems of optimal control. *Contact information:* e-mail: anton.dozenko@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-190-202

УДК 626.01

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ СТАНЦИОННОГО УЗЛА В СЛУЧАЕ НЕРАВНОМЕРНОЙ ОСАДКИ И ПРИ ВЫРАВНИВАНИИ ЕГО ПОЛОЖЕНИЯ

А.В. Александров

Проектно-изыскательский

и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука
Российская Федерация, 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 2

После неравномерной осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 в его железобетонных конструкциях возникло напряженно-деформированное состояние, которое явилось следствием изгиба здания ГАЭС-2 поперек потока. В железобетонных конструкциях возникли трещины, а в арматуре, которую пересекают образовавшиеся трещины, возникли значительные по величине растягивающие напряжения. Рабочее расчетное армирование располагается вдоль потока. Для стабилизации положения здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 предусматривали возведение временной перемычки реверсивного канала и понижение уровня воды в котловане здания ГАЭС-2. После этапа стабилизации планировалось выравнивание положения здания станционного узла методом компенсационного нагнетания. На основе пространственных конечно-элементных моделей здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 с основанием было выполнено определение напряженно-деформированного состояния несущих железобетонных конструкций после его неравномерной осадки и для периода выравнивания положения здания ГАЭС-2. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния, сформировавшегося после неравномерной осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 и понижения уровня воды в котловане здания ГАЭС-2, согласовывались с натурными данными о напряжениях в арматуре, полученными методом разгрузки арматуры. Анализ результатов расчетов напряженно-деформированного состояния показал, что требуется усиление несущих железобетонных конструкций здания станционного узла Загорской ГАЭС-2. Разработаны и обоснованы проектные решения по усилению несущих железобетонных конструкций здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 внешним армированием на основе углеродного волокна.

Ключевые слова: здание станционного узла, неравномерная осадка, несущие железобетонные конструкции, напряженно-деформированное состояние, трещины, напряжения в арматуре, внешнее армирование, управляемое компенсационное нагнетание

После неравномерной осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 в его железобетонных конструкциях возникло напряженно-деформированное состояние (НДС), которое явилось следствием изгиба здания ГАЭС-2 поперек потока, при этом в работу включилась арматура, которая при проектировании принималась как конструктивная (рабочее расчетное армирование размещается вдоль

потока). В арматуре, которую пересекают образовавшиеся трещины, возникают растягивающие напряжения.

Первоочередные мероприятия по восстановлению эксплуатационных свойств здания ГАЭС-2 предусматривали возведение временной перемычки реверсивного канала и понижение уровня воды в котловане здания ГАЭС-2 с последующей стабилизацией его положения.

При понижении уровня воды в котловане (т.е. при уменьшении выталкивающей силы воды, действующей на здание ГАЭС-2) вызывало опасение увеличение осадки правобережного участка здания ГАЭС-2, в том числе скачкообразный рост осадки здания ГАЭС-2 в случае нарушения контакта с сопрягающей подпорной стенкой ПС-3. При этом ожидалось повышение растягивающих напряжений в арматуре (направленной поперек потока) верхних конструкций здания ГАЭС-2 (в первую очередь в перекрытии на отм. 166,4 м).

Перечисленные обстоятельства потребовали усиления железобетонных конструкций здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 в период понижения уровня воды в котловане, а также в период выравнивания положения здания ГАЭС-2 с использованием метода компенсационного нагнетания.

Для этих целей на основе представленных ниже результатов расчетных исследований НДС несущих железобетонных конструкций здания ГАЭС-2 были разработаны проектные решения по их усилению композиционными материалами из углеродных волокон (в первую очередь перекрытия, расположенного на отм. 166,4 м) с учетом зарубежного и отечественного опыта [1—7].

При проведении расчетных исследований НДС несущих железобетонных конструкций учитывались конструктивные особенности здания Загорской ГАЭС-2 (рис. 1).

Следует отметить, что конструкция здания ГАЭС-2 размерами в плане 106×74 м представляет собой сложную пространственную систему массивных гидротехнических конструкций: монолитных стен (в том числе щитовой стены со стороны нижнего бьефа), плит перекрытий, колонн и др., выполненных из бетона класса В25 с армированием класса А500С.

В настоящее время железобетонные конструкции здания ГАЭС-2 находятся в напряженно-деформированном состоянии, сформировавшемся вследствие неравномерной осадки здания и понижения уровня воды в котловане с отм. 162,5 м до отм. 129,0 м.

В мировой инженерно-строительной практике отсутствует опыт расчетного обоснования и практической реализации сопоставимых по параметрам проектов выравнивания сооружений.

Расчеты НДС несущих конструкций проводились с целью обоснования возможности восстановления здания Загорской ГАЭС-2 путем его выравнивания методом управляемого компенсационного нагнетания и восстановительного усиления железобетонных конструкций.

Восстановление здания Загорской ГАЭС-2 является уникальной строительной операцией, требующей нестандартного подхода как в части расчетно-теоретических вопросов, так и в части организации и поэтапности выполнения расчетного обоснования проекта.

Задача математического моделирования просадки и выравнивания здания Загорской ГАЭС-2 методом компенсационного нагнетания выходит за пределы современной практики расчетного обоснования гидротехнических сооружений по таким параметрам, как величина пространственных перемещений здания, величина относительных деформаций грунта, степень трещиноватости железобетонных конструкций, находящихся в работе.

Расчетные исследования НДС несущих железобетонных конструкций здания ГАЭС-2 проводились в АО «Институт Гидропроект» на основе конечно-элементных моделей в рамках программного вычислительного комплекса ANSYS, при разработке которых учитывались результаты выполненных визуальных и инструментальных обследований (в том числе определение фактических напряжений методом разгрузки арматуры), а также мероприятия, предусмотренные при выполнении работ по стабилизации и выравниванию положения здания ГАЭС-2 (методом компенсационного нагнетания) с учетом результатов расчетов НДС основания, а также опыта моделирования работы гидротехнических сооружений [8—10].

При этом на первой стадии расчетных исследований была разработана пространственная конечно-элементная модель, в рамках которой воспроизводились особенности конструкции здания ГАЭС-2, особенности инженерно-геологического строения основания сооружения, снижение свойств основания в период непроектной осадки, свойства материалов заполнения пустот в основании (на стадии стабилизации положения здания ГАЭС-2), особенности нагрузок в период непроектной осадки, в период стабилизации положения, в период выравнивания и др. Вид пространственной конечно-элементной модели представлен на рис. 2.

На последующей стадии расчетных исследований выполнялась разработка более подробных конечно-элементных моделей выделенных характерных фрагментов конструкций здания ГАЭС-2 (нагруженных по контуру усилиями, полученными из решения общей задачи), в которых воспроизводилось трещинообразование, выявленное при обследованиях; фактическое армирование; нарушение сцепления арматуры с бетоном в зонах трещин и др. В качестве примера представлена схема моделирования арматурных стержней в железобетонных конструкциях (рис. 3).

При моделировании выравнивания положения здания определялись напряжения в арматуре несущих железобетонных конструкций, на основе величины которых далее определялось необходимое усиление конструкций композиционными материалами.

На последующей стадии расчетных исследований (с учетом проектных решений по усилению железобетонных конструкций внешним армированием из композитных материалов) в конечно-элементные модели включались элементы усиления конструкций (ленты из углеродного волокна), после чего расчеты НДС повторялись. При этом определялись напряжения как в существующей стержневой арматуре, так и в элементах усиления несущих конструкций, в том числе снижение растягивающих напряжений в стержневой арматуре за счет работы элементов усиления.

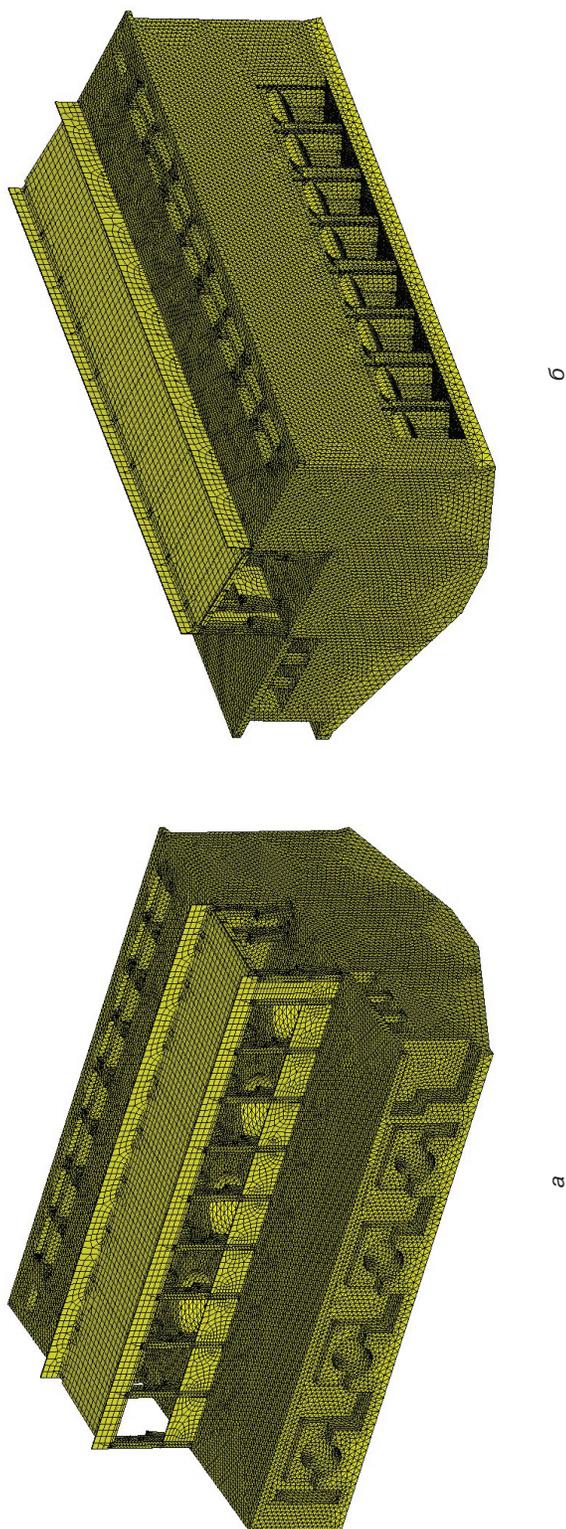


Рис. 2. Конечно-элементная модель здания ГАЭС-2: а — вид со стороны верхнего бассейна; б — вид со стороны нижнего бассейна
[Fig. 2. Finite element model of Zagorsk-2 structure: a — view from the upper basin side; б — view from the lower basin]

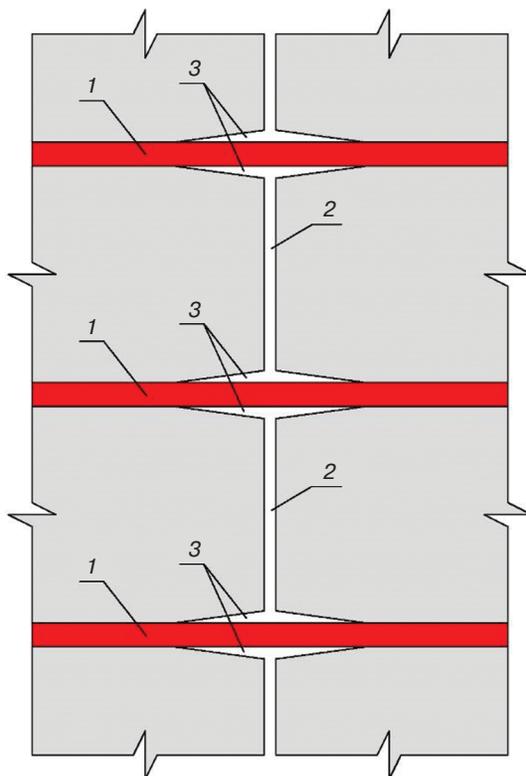


Рис. 3. Моделирование нарушения сцепления арматуры с бетоном в зоне вертикальной трещины: 1 — горизонтальная арматура; 2 — вертикальная трещина; 3 — участки нарушенного сцепления
[**Fig. 3.** Modeling of reinforcement to concrete bond failure in the region of vertical crack: 1 — horizontal reinforcement; 2 — vertical crack; 3 — regions of bond failure]

Определение фактического напряженно-деформированного состояния несущих конструкций станционного узла после неравномерной осадки

Результаты проведенных расчетов НДС указанных выше основных несущих конструкций здания Загорской ГАЭС-2 согласуются с данными инструментального исследования на основе применения метода разгрузки арматуры (таблица).

Результаты расчетов показывают, что в арматуре перекрытий и стен здания ГАЭС-2, направленной поперек потока, действуют растягивающие напряжения от 8,2 МПа до 243,0 МПа, которые не превышают предельно допустимых по нормам значений (расчетного сопротивления арматуры 435 МПа и нормативного сопротивления 500 МПа); при этом своих наибольших значений напряжения достигают на верхних отметках сооружения и плавно убывают с уменьшением отметок. В фундаментной плите здания ГАЭС-2 расположена сжатая зона.

Таблица

Результаты сопоставления расчетных и натуральных результатов определения фактических напряжений (МПа) в арматуре несущих железобетонных конструкций здания ГАЭС-2
[Table. Results of comparison of analytical and actual in-situ stresses (MPa) in the reinforcement of RC elements in Zagorsk-2 structure]

Отметка, м [Elevation, m]	Конструкция [Structure element]	Расчетные значения [Analytical values]	Натурные значения (методом «разгрузки арматуры» и по показаниям ПСАС) [Actual in-situ values (by “reinforcement de-stressing” method and by reinforcement force transducer measurements)]
166,40	Перекрытие в/о 7-8 (в районе трещины № 11) [floor deck along axes 7-8 (in the region of crack No. 11)]	250,0	243,0
166,40	Консоль стены НБ в/о 6-7 (в районе трещины № 38) [cantilever part of lower basin wall along axes 6-7 (in the region of crack No. 38)]	187,5	185,0
151,35	щитовая стена в/о 7-8 (пом. № 007.1) [panel wall along axes 7-8 (room No. 007.1)]	164,0	157,3
149,85	Перекрытие в/о 5-6 (в районе трещины № 13) [floor deck along axes 5-6 (in the region of crack No. 13)]	156,0	182,0
144,20	щитовая стена в/о 6-7 (пом. № 049) [panel wall along axes 6-7 (room No. 049)]	93,0	74,1
142,70	Перекрытие в/о 8-9 (в районе трещины № 28) [floor deck along axes 8-9 (in the region of crack No. 28)]	115,0	108,0
123,50	Верх фундаментной плиты в/о 7-8 (отсасывающая труба) [top of the foundations lab along axes 7-8 (in take aspiration pipe)]	6,0	8,2
120,50	Низ фундаментной плиты [bottom of the foundations lab]	-23,0	-35,0 (ПСАС)

Рекомендации по усилению несущих конструкций при понижении уровня воды в котловане станционного узла и различных вариантах взаимодействия с подпорной стеной ПС-3

На основе результатов расчетов фактического НДС и изменения НДС при понижении уровня воды в котловане здания ГАЭС-2 было определено необходимое усиление конструкций:

— на участках перекрытия на отм. 166,4 м потребовалось установить три слоя углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм ($5,29 \text{ см}^2$ на 1 пог. м) в направлении поперек потока и два слоя углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм — вдоль потока ($3,53 \text{ см}^2$ на 1 пог. м);

— на участках перекрытия на отм. 157,7 м потребовалось установить два слоя углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм ($3,53 \text{ см}^2$ на 1 пог. м) в направлении поперек потока и один слой углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм — вдоль потока ($1,76 \text{ см}^2$ на 1 пог. м);

— на участках перекрытия на отм. 149,85 м потребовалось установить три слоя углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм ($5,29 \text{ см}^2$ на 1 пог. м) в направлении поперек потока и два слоя углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм — вдоль потока ($3,53 \text{ см}^2$ на 1 пог. м);

— на участках щитовой стены в отм. 157,7—164,9 м и в отм. 149,85 м — 156,7 м потребовалось установить два слоя углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм ($3,53 \text{ см}^2$ на 1 пог. м) в горизонтальном направлении и один слой углеродной ленты шириной 300 мм с просветами 200 мм — в вертикальном направлении ($1,76 \text{ см}^2$ на 1 пог. м).

Представленные результаты были реализованы в проекте усиления железобетонных конструкций здания ГАЭС-2.

Результаты расчетов НДС и рекомендации по усилению несущих конструкций при выравнивании положения здания станционного узла

Результаты расчетов НДС для стадии выравнивания положения здания ГАЭС-2 показали, что возникает определенное растяжение в несущих конструкциях, расположенных в диапазоне от отметки 117,0 м до отметки около 132,0 м (т.е. в трех конструкциях, в которых после непроектной осадки возникло сжатие или незначительное растяжение); при этом максимальные растягивающие напряжения в арматуре направленной поперек потока составили:

- в фундаментной плите мокрой потерны на отм. 119,5 м — 61,3 МПа;
- фундаментной плите отсасывающих труб на отм. 121,5 м — 114,5 МПа;
- перекрытии на отм. 125,1 м — 113,5 МПа.

В железобетоне несущих конструкций, расположенных выше, отмечалось повсеместное сжатие.

На основе анализа полученных результатов было рекомендовано выполнить усиление несущих конструкций (расположенных в диапазоне от отметки 117,0 м до отметки около 132,0 м) внешним армированием с применением композитных материалов из углеродного волокна (с учетом опыта разработки технических по усилению конструкций перекрытий на отметках 149,85—166,4 м, а также щитовой стены в отметках 149,85—164,9 м для стадии понижения уровня воды в котловане здания ГАЭС-2).

Усиление внешним армированием производилось с использованием углеродной ткани FibArm Tape 530/300 (шириной 300 мм и толщиной волокон 0,294 мм) и связующего FibArm Resin 530+.

Расчетное сопротивление углеродной ткани растяжению принималось равным 2160 МПа, модуль деформации — 245000 МПа.

Представленные выше результаты расчетов были реализованы в проекте усиления несущих железобетонных конструкций здания станционного узла.

На рисунке 4 показан фрагмент разреза здания по потоку (пунктиром обозначены конструктивные элементы, подлежащие усилению). На рисунке 5 приведена схема усиления перекрытия на отм. 166,4 м.

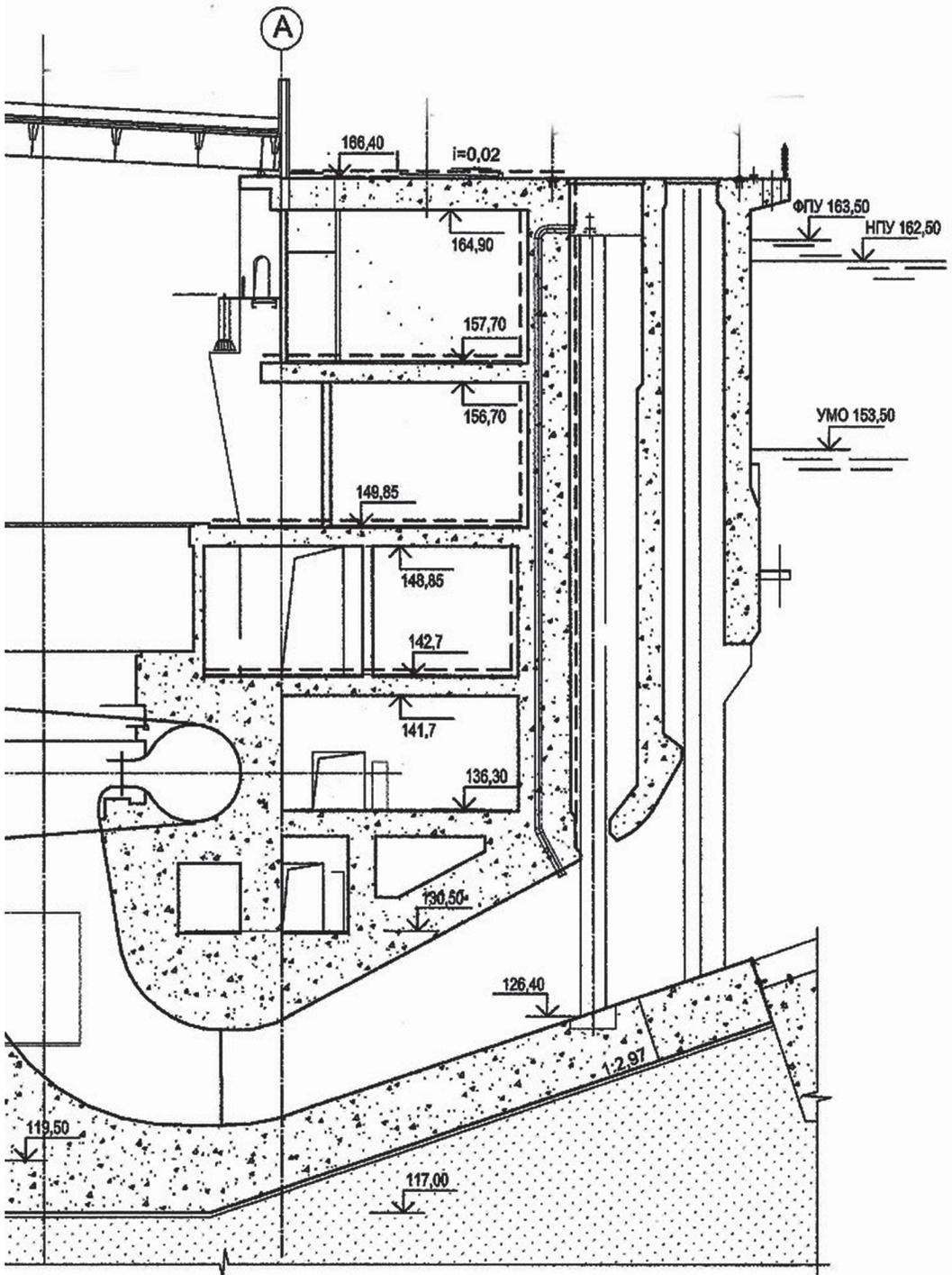


Рис. 4. Схема усиления
[Fig. 4. Strengthening scheme]

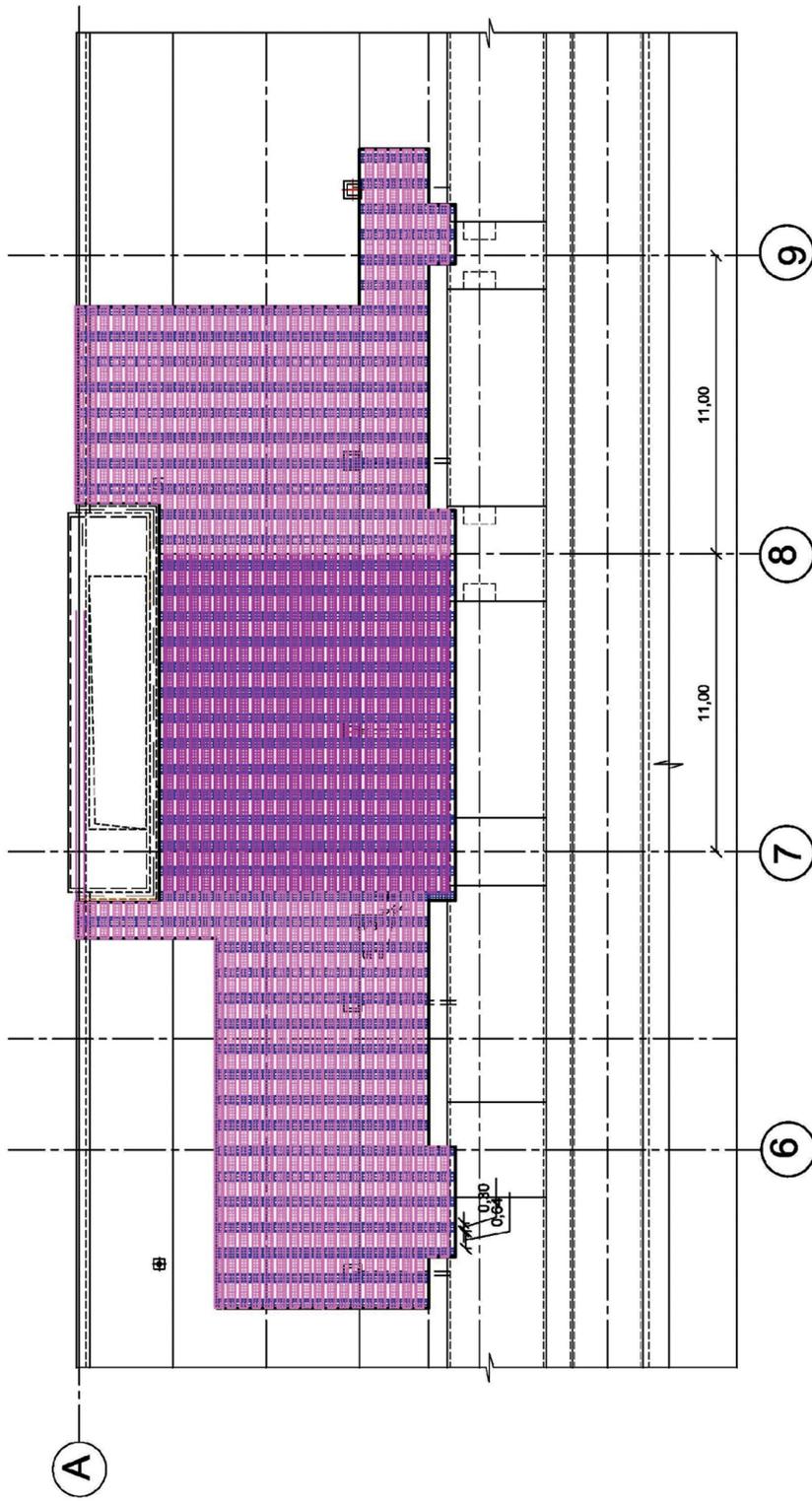


Рис. 5. Схема усиления перекрытия на отм. 166,40 м
[Fig. 5. Strengthening scheme of floor deck at 166.40 m elevation]

Выводы

На основе разработанных пространственных конечно-элементных моделей и выделенных характерных фрагментов несущих железобетонных конструкций были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций здания станционного узла.

Расчетные исследования НДС несущих железобетонных конструкций здания ГАЭС-2 выполнялись для определения фактического состояния, сформировавшегося после неравномерной осадки и понижения уровня воды в котловане здания станционного узла, а также при планируемом выравнивании его положения.

Результаты расчетов НДС несущих железобетонных конструкций здания станционного узла после непроектной осадки согласуются с данными натурального определения фактических напряжений в арматуре методом разгрузки арматуры.

На основе анализа результатов расчетов НДС железобетонных конструкций здания станционного узла определено требуемое для их усиления количество внешнего армирования из углеродного волокна.

Разработаны проектные решения по усилению несущих железобетонных конструкций здания станционного узла внешним армированием на основе углеродного волокна.

На последующих этапах работы по выравниванию здания ГАЭС (с учетом результатов натурального эксперимента на опытном участке) рекомендуется использовать разработанные методики конечно-элементного моделирования в рамках расчетов системы «задние ГАЭС — основание» в пространственной постановке, связанные с нелинейным моделированием грунтов и нелинейным моделированием трещиноватого железобетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Sandeep S. Pendhari, Tarun Kant, Yogesh M. Desai. Application of polymer composites in civil construction: A general review // Composite Structures. 2008. № 84. Pp. 114—124.
- [2] Einde L.V.D., Zhao L., Seible F. Use of FRP composites in civil structural application // Constr. Build Mater. 2003. №17. Pp. 389 M.R. 403.
- [3] Duell, J.M., Wilson, J.M., Kessler, M.R. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 85(2008). Pp. 782—789.
- [4] Mohitpour M., Golshan H., Murray A. Pipeline design and construction: a practical approach // ASME Press. New York, 2003. Pp. 499—518.
- [5] Чернявский В.Л. Система ремонта и усиления строительных конструкций // Гидротехника. 2010—2011. № 4(21)—5(22). С. 60—63.
- [6] Сердюк А.И., Чернявский В.Л. Опыт усиления строительных конструкций композиционными материалами при реконструкции Баксанской ГЭС // Гидротехника. № 3(32). 2013. С. 115—117.
- [7] Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б., Александров А.В. Новая технология ремонта ГТС посредством армирования композитными материалами // Изв. ВНИИГ. Т. 280. 2016. С. 3—10.
- [8] Lisichkin S.E., Rubin O.D., Shakars I.É., and Novikov S.P. “Assessment of the stress-strain state of the left block of the Płaviņas hydroelectric station powerhouse with consideration of the data of on-site observations”. Gidrotekh. Stroit., No. 2. 47—53 (1998).

- [9] *Rubin O.D., Lisichkin S.E., Grebenshchikov V.P., Tsybakov V.A., Nefedov A.V., Katanov A.D., and Ponomarev D.I.* “Analysis of a reliability assurance solution for the structure of spillway No. 2 of the concrete dam at the Boguchanskaya HPP”. *Izv. VNIIG. Beton. Zhelezobet. Gidrotekh. Sooruzh.*, 244, 227—233 (2005).
- [10] *Rubin O.D., Lisichkin S.E., Lyapin O.B., and Nefedov A.V.* “Research on concrete and reinforced concrete power-generating structures”. *Gidrotekh. Stroit.*, No. 8/9. 22—28 (1999).

© Александров А.В., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 10 февраля 2018

Дата принятия к печати: 11 апреля 2018

Для цитирования:

Александров А.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния здания станционного узла в случае неравномерной осадки и при выравнивании его положения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. Т. 19. № 2. С. 190—202. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-190-202

Сведения об авторе:

Александров Андрей Викторович — инженер, заместитель главного инженера по организации строительства и архитектуре, АО «Институт Гидропроект». *Область научных интересов:* гидротехническое строительство, восстановление железобетонных сооружений после непроектных осадок, усиление железобетонных конструкций композитными материалами. *Контактная информация:* e-mail: a.aleksandrov@hydroproject.ru

NUMERICAL MODELLING OF POWERHOUSE STRUCTURE STRESS-STRAIN STATE CAUSED BY UNEQUAL SETTLEMENT AND DURING ITS LEVELLING OPERATIONS

A.V. Aleksandrov

Designing, Surveying and Research Institute “Hydroproject” named after S.Y. Zhuk
2, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation

Abstract. Reinforced concrete elements of the Zagorsk-2 pumped storage station structure had got into unexpected stress-strain state after unequal settlement and bending of the structure crosswise of the flow as a result. Cracks emerged in the load bearing reinforced concrete elements and the reinforcement crossing the cracks suffered significant tensile stresses. Important to mention, that the main reinforcement is arranged along the flow. There was a cofferdam designed and constructed across the reverse channel, which allowed to decrease the water level and remove water from the channel to provide stabilized position of the powerhouse. After stabilization of the powerhouse, it was planned to level the powerhouse by the compensation grouting method. Based on the finite element soil-structure model of the powerhouse, the stress-strain state of reinforced concrete elements subject to unequal settlement and during the levelling operations was determined. The results of the stress-strain state analysis were compared with the actual in-situ stress data obtained by the “reinforcement de-stressing”

method. According to the results of the analysis, it is necessary to strengthen the RC load bearing structures of the Zagorsk-2 powerhouse. In the article, the main design proposals for strengthening the RC load bearing structures of the Zagorsk-2 powerhouse by the external carbon fibre reinforcement are given and justified.

Key words: powerhouse, unequal settlement, load bearing structures, stress-strain state, cracks, tension in rebars, external reinforcement, controlled compensation grouting

REFERENCES

- [1] Sandeep S. Pendhari, Tarun Kant, Yogesh M. Desai. Application of polymer composites in civil construction: A general review. *Composite Structures*. 2008. No. 84. P. 114—124.
- [2] Einde L.V.D., Zhao L., Seible F. Use of FRP composites in civil structural application. *Constr. Build Mater.*, No. 17. 2003. P. 389 M.R. 403.
- [3] Duell, J.M., Wilson, J.M., Kessler, M.R. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008. No. 85. P. 782—789.
- [4] Mohitpour M., Golshan H., Murray A. Pipeline design and construction: a practical approach. ASME Press; New York, 2003. Pp. 499—518.
- [5] Chernyavskij V.L. Sistema remonta i usileniya stroitel'nykh konstruksii [Repair and strengthening of structures]. *Hydrotehnika*. 2010—2011. No. 4(21)—5(22). P. 60—63. (In Russ.)
- [6] Serdyuk A.I., Chernyavskij V.L. Opyt usileniya stroitel'nykh konstruksii kompozitsionnymi materialami pri rekonstruksii Baksanskoi GES [Practical experience of strengthening structures of Baksan Hydroelectric Power Station with composite materials during reconstruction]. *Hydrotehnika*. No. 3(32). 2013. P. 115—117. (In Russ.)
- [7] Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B., Aleksandrov A.V. Novaya tekhnologiya remonta GTS posredstvom armirovaniya kompozitnymi materialami [New technology of repairing hydraulic structures by strengthening with composite materials]. *Proceeding of the VNIIG*. Vol. 280. 2016. P. 3—10. (In Russ.)
- [8] Lisichkin S.E., Rubin O.D., Shakars I.É., and Novikov S.P. Assessment of the stress-strain state of the left block of the Płaviņas hydroelectric station powerhouse with consideration of the data of on-site observations. *Gidrotekh. Stroit.*, 1998. No. 2. P. 47—53.
- [9] Rubin O.D., Lisichkin S.E., Grebenshchikov V.P., Tsybakov V.A., Nefedov A.V., Katanov A.D., and Ponomarev D.I. Analysis of a reliability assurance solution for the structure of spillway No. 2 of the concrete dam at the Boguchanskaya HPP. *Izv. VNIIG. Beton. Zhelezobet. Gidrotekh. Sooruzh.*, 2005. Vol. 244. P. 227—233.
- [10] Rubin O.D., Lisichkin S.E., Lyapin O.B., and Nefedov A.V. Research on concrete and reinforced concrete power-generating structures. *Gidrotekh. Stroit.*, No. 8/9. 22—28 (1999).

Article history:

Received: February 10, 2018

Accepted: April 11, 2018

For citation:

Aleksandrov A.V. (2018). Numerical modelling of powerhouse structure stress-strain state caused by unequal settlement and during its levelling operations. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 190—202. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-190-202

Bio Note:

Andrey V. Aleksandrov — engineer, deputy chief engineer for organization of construction and architecture, JSC “Institute Hydroproject”. *Research Interests:* hydrotechnical construction, restoration of reinforced concrete structures after unpredicted settlements, strengthening of reinforced concrete structures with composite materials. *Contact information:* e-mail: a.aleksandrov@hydroproject.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-203-213

УДК 69.001.12

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙЧАТЫХ ГЕЛИКОИДАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК

М. Жиль-улбе, А.С. Маркович, Е.М. Тупикова, Ю.В. Журбин

Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

Рассматривается устойчивость оболочек в форме прямых геликоидов. Анализ устойчивости выполнялся на основе компьютерных моделей четырех оболочек одинаковой высоты с равными длинами образующих, но с различным числом свободных витков. Для расчета использовались треугольные оболочечные конечные элементы. Общее количество узловых неизвестных было одинаковым в каждой из рассматриваемых задач и составляло 16 206. Численное исследование устойчивости выполнялось методом конечных элементов в программном комплексе Lira-Sapг 2017. Расчет устойчивости оболочек производился на комбинацию нагрузок, включающую в себя собственный вес с коэффициентом надежности 1,1 и поперечную равномерную нагрузку в проекции на горизонтальную поверхность интенсивностью $0,2 \text{ т/м}^1$ с коэффициентом надежности 1,2. Граничные условия: упругое защемление оболочек вдоль нижней и верхней образующих. Для построения срединной поверхности каждой оболочки использовались параметрические уравнения в прямоугольных координатах. Определенный интерес представляет исследование собственных колебаний рассматриваемых оболочек. При нахождении частот и форм свободных колебаний учитывался только собственный вес геликоидальных оболочек.

Ключевые слова: устойчивость оболочек, комбинация нагрузок, линейчатые геликоидальные оболочки, поперечные сдвиги, НДС, прямой геликоид, оболочки сложной геометрии, коэффициент устойчивости

История вопроса расчета линейчатых геликоидальных оболочек

В работах [1–4] была рассмотрена геликоидальная оболочка из ортотропного композитного материала под действием нормальной распределенной нагрузки. Аналогичная задача рассматривается в статье [5], но не по теории тонких оболочек Кирхгофа, а с учетом поперечных сдвигов. Согласно результатам экспериментальных исследований, именно разрушения от поперечного сдвига часто ограничивают несущую способность армированных конструкций. Поперечные сдвиги учитываются согласно обобщенным кинематическим гипотезам Тимошенко, краевые условия на лицевых поверхностях оболочки удовлетворяются.

Установлено, что учет поперечного сдвига влияет на НДС конструкции значительно более, чем учет обжатия. Расчет показал, что учет поперечного сдвига

¹ Патент России № 2101560, МКИ6 F 03 D 5/00, 3/06. Шнековый ветроротор / *Смольский И.И., Мельников В.П., Кавун И.Н.*, опубл. 10.01.98, Бюл. № 1.

необходим при расчете НДС оболочек, изготовленных из материала, армированного высокомолекулярными волокнами [4].

Расчет оболочек из железобетона может проводиться без учета поперечного сдвига в рамках классической теории Кирхгофа—Лява.

В публикации [5] даются формулы, согласно которым можно определить все внутренние силовые факторы в любом сечении плитчатой лестницы при условии жесткого защемления на одной опоре и шарнирного опирания на второй.

Расчетом лопаток с начальной закруткой занимались исследователи И.И. Биргер и Б.Ф. Шорр [6; 7]. И.И. Биргер разработал приближенное решение задачи о пространственном НДС лопаток турбомашин. В работах [8; 9] изучалось влияние начальной закрутки на НДС лопаток большей по сравнению с толщиной криволинейного профиля ширины. Теория естественно закрученных стержней с учетом гипотезы ортогональных сечений была применена к расчету начально закрученных лопаток в работе [10]. Б.Ф. Шорр учитывал также нормальные напряжения при кручении стержня согласно модели С.П. Тимошенко. В работе [11] рассмотрены методы расчета винтовых оболочек в форме торсов-геликоидов. В работе [12] С.Н. Кривошапко применил асимптотический метод малого параметра для аналитического расчета тонких упругих торсов-геликоидов. Мэнсфилд Е. [13] исследовал конечные неоднородные деформации спиральной полосы.

Упругопластическая работа тонкой оболочки в форме геликоида общего вида из изотропного материала с учетом физической и геометрической нелинейности изучалась в работе Б.М. Меерсона [14].

Бесконечно длинные оболочки в форме геликоидов общего вида произвольного профиля изучались Дж. Г. Симмондсом [8; 9]. В поставленной задаче оболочка находится под действием осевой силы, крутящего момента и распределенного внутреннего давления. Выводятся уравнения физических, геометрических соотношений и уравнений равновесия и неразрывности деформаций с учетом геометрической нелинейности. Приведен числовой пример расчета прямого геликоида на растяжение и кручение трубы произвольного профиля на чистый изгиб.

Единственным апробированным аналитическим методом расчета оболочек в форме разворачивающегося геликоида является асимптотический метод малого параметра. В работе [10] та же задача для пологого случая без учета коэффициента Пуассона была решена А.А. Сальманом. С.Н. Кривошапко [12] занимался вопросом модификации метода малого параметра для торсов-геликоидов, анализируя возможности решений в рядах. Дальнейшее развитие этот вопрос получил в работе М.И. Рынковой [15].

Мэнсфилд Е. изучал поведение упругой оболочки в форме цилиндрической винтовой полосы под действием сосредоточенной нагрузки и крутящего момента [13]. Выявлена практически важная зависимость между нагрузкой и деформациями.

Аналитические методы расчета дорожных сооружений используются в основном как ориентировочные и предварительные, так как содержат в себе значительные упрощения. Эти методы включают в себя метод внецентренного сжатия,

метод балочного ростверка и метод плитно-балочных конструкций. Анализ плитного пролетного строения может производиться с применением разных расчетных моделей в зависимости от вида плиты, например, методами теории упругости или при помощи метода коэффициента поперечной установки.

Устойчивость оболочек в форме прямого геликоида

Довольно интересной является проблема устойчивости оболочек сложной геометрии. В настоящей статье рассматривается устойчивость оболочек в форме прямых геликоидов. Анализ устойчивости выполнялся на основе компьютерных моделей четырех оболочек одинаковой высоты $h = 18$ м с равными длинами образующих $l = 10$ м, но с различным числом свободных витков (рис. 1).

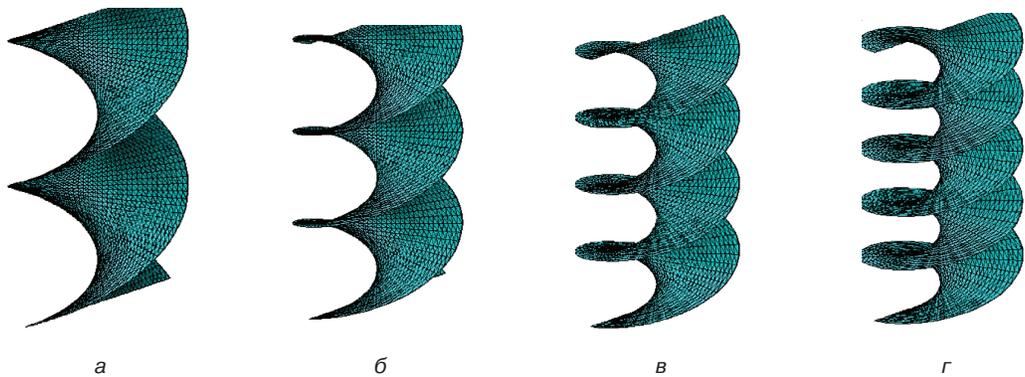


Рис. 1. Конечно-элементные модели оболочек: *а* — геликоид с одним свободным витком; *б* — то же с двумя витками; *в* — то же с тремя; *г* — то же с четырьмя
[**Fig. 1.** Finite element models of shells: *a* — a helicoid with one free turn; *b* — the same with two; *v* — at the same with three; *g* — the same with four]

Для построения срединной поверхности каждой оболочки использовались параметрические уравнения в прямоугольных координатах, которые представляются следующим образом:

для геликоида с четырьмя свободными витками —

$$x = (10t - 5)\cos(5\pi s); y = (10t - 5)\sin(5\pi s); z = 0,1(\pi s);$$

геликоида с тремя свободными витками —

$$x = (10t - 5)\cos(4\pi s); y = (10t - 5)\sin(4\pi s); z = 0,1(\pi s);$$

геликоида с двумя свободными витками —

$$x = (10t - 5)\cos(3\pi s); y = (10t - 5)\sin(3\pi s); z = 0,1(\pi s);$$

геликоида с одним свободными витком —

$$x = (10t - 5)\cos(2\pi s); y = (10t - 5)\sin(2\pi s); z = 0,1(\pi s),$$

где t и s — переменные, значения которых изменяются от 0 до 1.

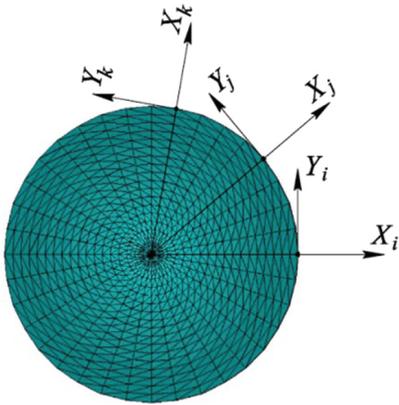


Рис. 2. Локальная система координат узлов
 [Fig. 2. Local coordinate system of nodes]

Численное исследование устойчивости выполнялось методом конечных элементов в программном комплексе Lira-Sapr 2017. Для удобства анализа результатов расчета применялась локальная система координат (рис. 2), согласно которой ось X имела направление от вертикальной оси симметрии оболочки до характерного узла, а оси Y и Z образовывали с ней правую тройку.

Для расчета использовались треугольные оболочечные конечные элементы (№ 42). Общее количество узловых неизвестных было одинаковое в каждой из рассматриваемых задач и составляло 16 206.

Расчет устойчивости оболочек производился на комбинацию нагрузок, включающую в себя собственный вес с коэффициентом надежности 1,1 и поперечную равномерную нагрузку в проекции на горизонтальную поверхность интенсивностью $0,2 \text{ т/м}^2$ с коэффициентом надежности 1,2.

Принимались следующие характеристики материала: модуль упругости $E = 3\,600\,000 \text{ т/м}^2$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,18$; толщина оболочки $h = 10 \text{ см}$; плотность материала $\rho = 2,5 \text{ т/м}^3$.

Граничные условия: упругое защемление оболочек вдоль нижней и верхней образующих. Жесткости защемления: $R_X = R_Y = R_Z = 100\,000 \text{ т/м}$, $\theta_X = \theta_Y = \theta_Z = 100\,000 \text{ тм}$.

Результаты расчета графически представлены на рис. 3–6 и сведены в табл. 1.

Дополнительный учет нелинейных эффектов приводит к снижению коэффициентов устойчивости по сравнению с линейным расчетом.

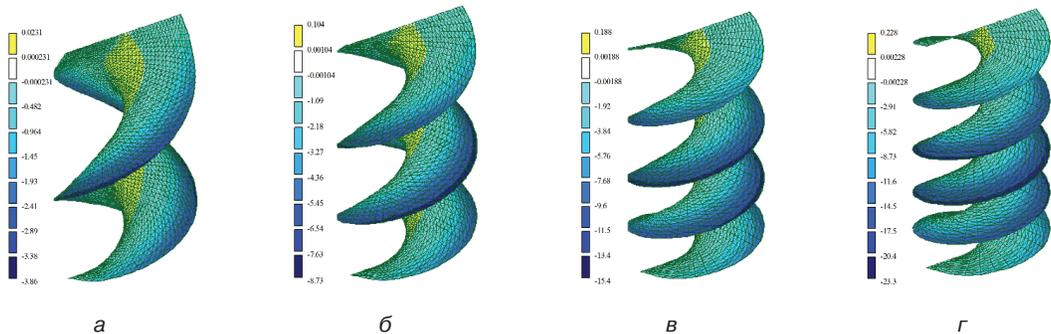


Рис. 3. Изополя вертикальных перемещений Z (мм) для геликоидов:
 а — с одним свободным витком; б — то же с двумя витками;
 в — то же с тремя; г — то же с четырьмя

[Fig. 3. Isofields of displacements along the Z -axis (mm) for helicoids:
 а — with one free turn; б — the same with two;
 в — the same with three; г — the same with four]

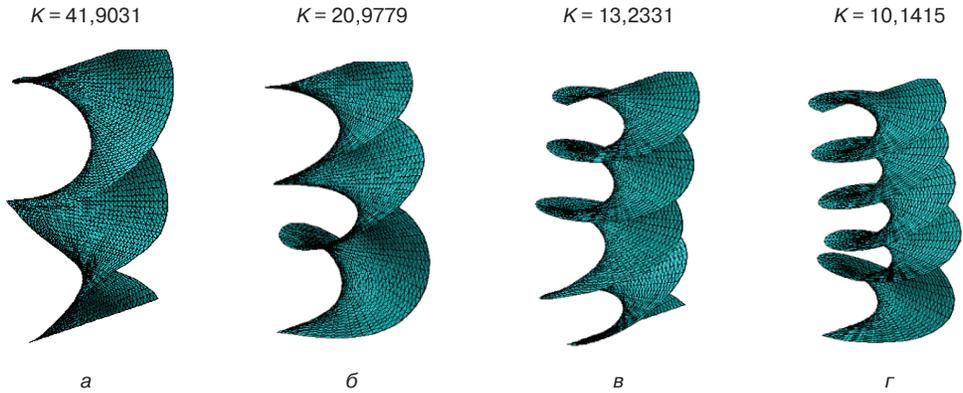


Рис. 4. Первая форма потери устойчивости для геликоидов: *a* — с одним свободным витком; *б* — то же с двумя витками; *в* — то же с тремя; *г* — то же с четырьмя
[**Fig. 4.** The first form of loss of stability for helicoids: *a* — with one free turn; *б* — the same with two; *в* — the same with three; *г* — the same with four]

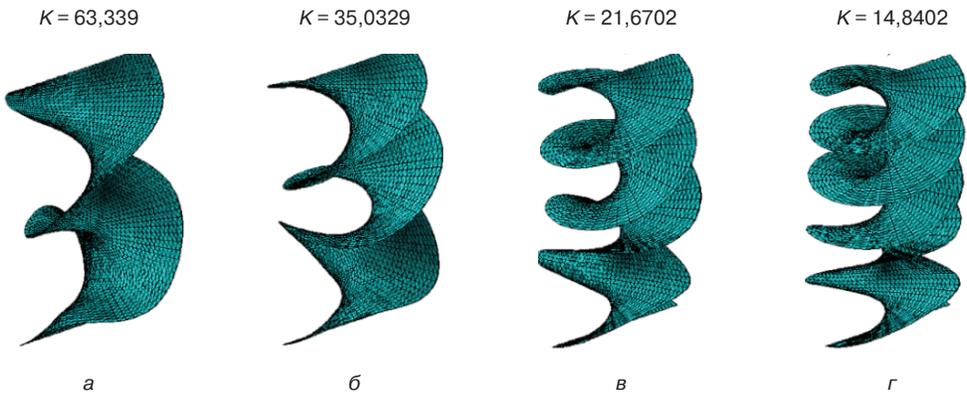


Рис. 5. Вторая форма потери устойчивости для геликоидов: *a* — с одним свободным витком; *б* — то же с двумя витками; *в* — то же с тремя; *г* — то же с четырьмя
[**Fig. 5.** The second form of loss of stability for helicoids: *a* — with one free turn; *б* — the same with two; *в* — the same with three; *г* — the same with four]

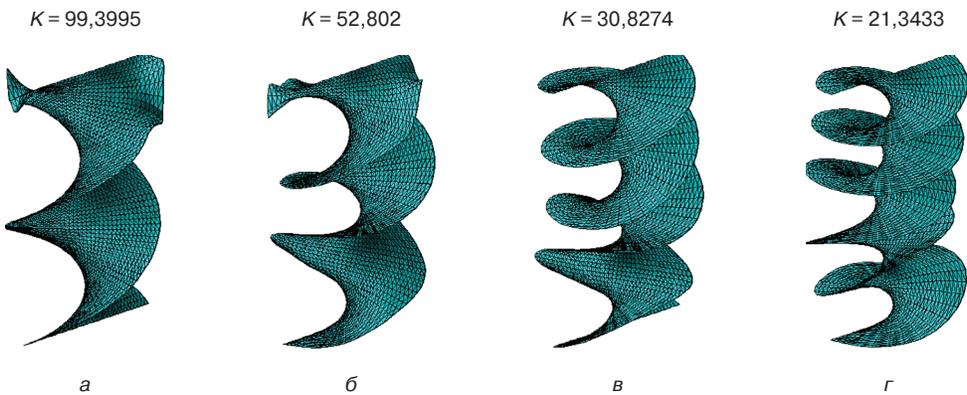


Рис. 6. Третья форма потери устойчивости для геликоидов: *a* — с одним свободным витком; *б* — то же с двумя витками; *в* — то же с тремя; *г* — то же с четырьмя
[**Fig. 6.** The third form of loss of stability for helicoids: *a* — with one free turn; *б* — the same with two; *в* — the same with three; *г* — the same with four]

Таблица 1

Формы потери устойчивости [Table 1. Forms of loss of stability]

Число свободных витков геликоида [Number of free turns of a helicoid]	Макс. прогиб [Max. deflection], мм	Формы потери устойчивости [Forms of loss of stability]								
		1			2			3		
		Коэффициенты устойчивости [Coefficients of stability] K								
		Максимальные перемещения для каждой формы [Maximum displacements for each form], мм								
Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	-3,86	40,9031			63,339			99,3995		
		721	>1000	-751	928	979	-924	137	470	-769
2	-8,73	20,9779			35,0329			52,802		
		697	>1000	-981	976	973	-994	696	702	-929
3	-15,4	13,2331			21,6702			30,8274		
		670	791	-997	850	>1000	-961	493	656	-993
4	-23,3	10,1415			14,8402			21,3433		
		659	483	-998	941	920	-994	479	628	-995

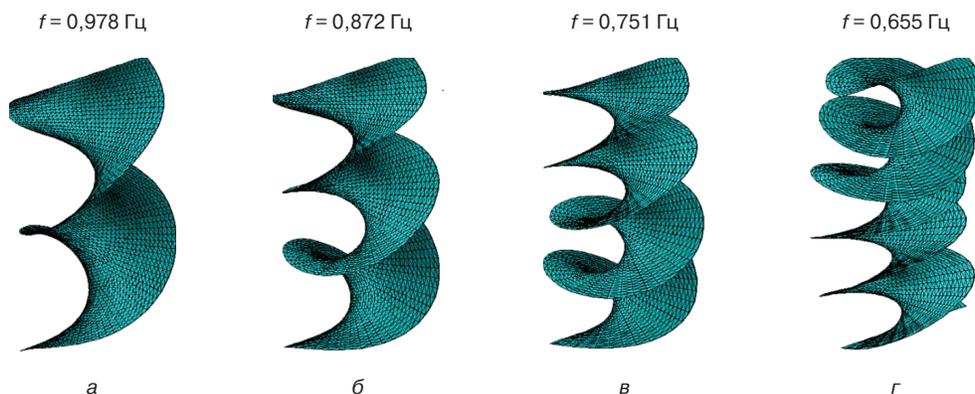


Рис. 7. Первые формы собственных колебаний для геликоидов: *а* — с одним свободным витком; *б* — то же с двумя витками; *в* — то же с тремя; *г* — то же с четырьмя
[Fig. 7. The first forms of natural oscillations for helicoids: *a* — with one free turn; *б* — the same with two; *в* — the same with three; *г* — the same with four]

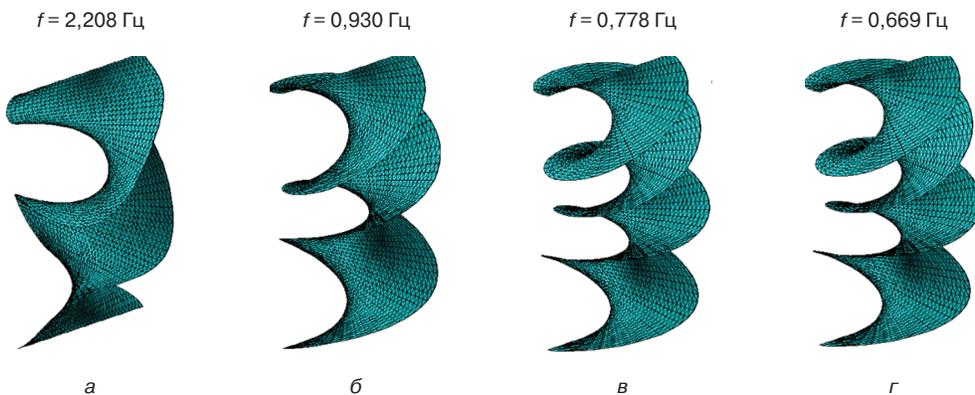


Рис. 8. Вторые формы собственных колебаний для геликоидов: *а* — с одним свободным витком; *б* — то же с двумя витками; *в* — то же с тремя; *г* — то же с четырьмя
[Fig. 8. The second forms of natural oscillations for helicoids: *a* — with one free turn; *б* — the same with two; *в* — the same with three; *г* — the same with four]

Определенный интерес представляет исследование собственных колебаний рассматриваемых оболочек. При нахождении частот и форм свободных колебаний учитывался только собственный вес геликоидальных оболочек.

Полученные результаты модального анализа показаны на рис. 7–9 и приведены в табл. 2.

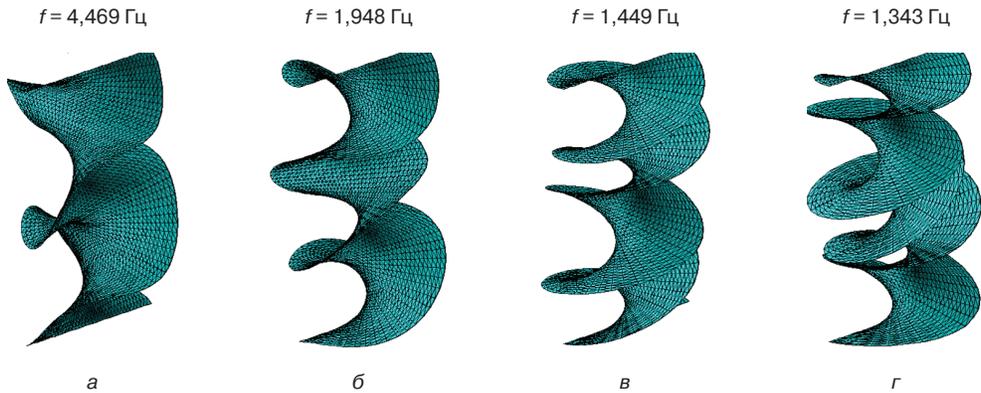


Рис. 9. Третьи формы собственных колебаний для геликоидов: *a* — с одним свободным витком; *б* — то же с двумя витками; *в* — то же с тремя; *г* — то же с четырьмя
[Fig. 9.] Third forms of natural oscillations for helicoids: *a* — with one free turn; *б* — the same with two; *в* — the same with three; *г* — the same with four

Таблица 2

Формы собственных колебаний [Table 2. Forms of natural oscillations]

Число свободных витков геликоида [Number of free turns of a helicoid]	Формы собственных колебаний [Forms of natural oscillations]								
	1			2			3		
	Частота собственных колебаний [Natural frequency] f , Гц				Период собственных колебаний [The period of natural oscillations] T , с				
	Максимальные перемещения для каждой формы [Maximum displacements for each form], мм								
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0,978	1,023		2,208	0,453		4,469	0,224	
	645	>1000	-643	958	>1000	-765	656	730	<-1000
2	0,872	1,147		0,930	1,076		1,948	0,513	
	>1000	936	-802	975	>1000	-911	479	646	<-1000
3	0,751	1,332		0,778	1,286		1,449	0,690	
	837	>1000	-656	933	873	<-1000	366	389	<-1000
4	0,655	1,526		0,669	1,495		1,343	0,745	
	977	>1000	799	>1000	885	-923	630	432	<-1000

При увеличении числа витков геликоидальной оболочки возрастает ее масса, что приводит к уменьшению частот свободных колебаний. Стоит заметить, что для оболочек с относительно небольшим количеством витков данный факт существенного значения не имеет.

ВЫВОДЫ

Наибольшей устойчивостью обладает геликоид с одним свободным витком ($K = 41,9031$). Устойчивость геликоида с двумя свободными витками оказалась

вдвое меньше ($K = 20,9779$). Однако, как показал расчет, устойчивость оболочек с тремя и четырьмя свободными витками различается лишь на 30% (коэффициенты устойчивости равны 13,2331 и 10,1415 соответственно). Отчасти это можно объяснить тем, что наблюдается некоторое сглаживание геометрии срединной поверхности этих оболочек.

Исследовав устойчивость геликоидов с большим количеством витков, можно установить, что коэффициент устойчивости имеет тенденцию к резкому снижению до определенного предела, в случае геликоидальных оболочек с большим числом витков (более 10) дальнейшее увеличение количества витков не приводит к существенному уменьшению коэффициента устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Кривошапко С.Н., Иванов В.Н.* Энциклопедия аналитических поверхностей. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 560 с.
- [2] *Александров П.В., Немировский Ю.В.* Исследование напряженного состояния армированных геликоидальных оболочек // Известия вузов. Строительство. 1994. № 11. С. 48—55.
- [3] *Александров П.В., Немировский Ю.В.* Напряженное состояние армированных геликоидальных оболочек // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1991. № 9. С. 18—24.
- [4] *Czaplinski K., Marcinkowski Z., Swiecicki W.* An analysis of stress in the combined structure of a spiral stairway // eighth Cong. Mater. Fest. Budapest. 28 Sept.-1 Oct. 198. Lectures. Vol. 3. Budapest. 1982. 1003—1007.
- [5] *Неделчев В.* Вита плочеста стълба, ставно подпряна в единия край // Строительство. 1989. Т. 36. № 5. С. 3—4. (Болгарск.).
- [6] *Биргер И.А.* Пространственное напряженное состояние в лопатках с начальной закруткой // Труды ЦИАМ. 1982. № 996. С. 7—23.
- [7] *Шорр Б.Ф.* Колебания закрученных стержней // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1961. № 3. С. 35—39.
- [8] *Simmonds James G.* General helicoidal shells undergoing large, one-dimensional strains or large inextensional deformations // Int. J. Solids and Struct. 1984. Vol. 20. No. 1. P. 13—30.
- [9] *Simmonds James G.* Surfaces with metric and curvature tensors that depend on one coordinate only are general helicoids // Q. Appl. Math. Vol. 37. P. 82—85.
- [10] *Сальман Абдалла А. Аль-Духейсат.* Аналитический и численный подходы к проблеме статического расчета тонкой винтовой оболочки с развертывающейся срединной поверхностью / Реконструкция зданий и сооружений. Усиление оснований и фундаментов: Межд. научно-практ. конф. Пенза: ПГАСА, ПДЗ, 1999. С. 67—70.
- [11] *Кривошапко С.Н., Абдельсалам М.А.* Методы расчета винтовых оболочек в форме торсов-геликоидов / Современное строительство: Межд. научно-практ. конференция. Пенза: ПГАСА, ПДЗ, 1998. С. 105—107.
- [12] *Кривошапко С.Н.* Применение асимптотического метода малого параметра для аналитического расчета тонких упругих торсов-геликоидов // Пространственные конструкции зданий и сооружений. М.: ДевяткаПринт, 2004. Вып. 9. С. 36—44.
- [13] *Mansfield E.* On finite inextensional deformation of a helical strip // Int. J. Non-linear Mech. 1980. Vol. 15. No. 6. P. 459—467.
- [14] *Меерсон Б.М.* Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния винтообразной оболочки. Уфа, 1988. 22 с. (Рукопись деп. в ВИНТИ 12.07.88., № 5593-В88 г.).
- [15] *Рынкoвская М.И.* Изгибание и задачи расчета тонких упругих оболочек в форме прямого и развертывающегося геликоидов на распределенную нагрузку и осадку одной из криволинейных опор: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2013. 217 с.

- [16] Мэнсфилд Э. О конечной неоднородной деформации спиральной полосы // Int. J. Нелинейный мех. 1980. Vol. 15. № 6. P. 459–467.

© Жиль-улбе М., Маркович А.С., Тупикова Е.М., Журбин Ю.В.. 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 08 февраля 2018

Дата принятия к печати: 17 апреля 2018

Для цитирования:

Жиль-улбе М., Маркович А.С., Тупикова Е.М., Журбин Ю.В. Численное моделирование устойчивости линейчатых геликоидальных оболочек // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 2. С. 203–213. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-203-213

Сведения об авторах:

Жиль-улбе Матье — кандидат технических наук, доцент департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* теория тонких упругих оболочек, нелинейная устойчивость оболочек сложной геометрии, компьютерное моделирование. *Контактная информация:* e-mail: gil-oulbem@hotmail.com

Маркович Алексей Семенович — кандидат технических наук, доцент департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* строительная механика, численные методы расчета сооружений, компьютерное моделирование. *Контактная информация:* e-mail: markovich.rudn@gmail.com

Тупикова Евгения Михайловна — кандидат технических наук, ассистент департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* теория тонких упругих оболочек, нелинейная устойчивость оболочек сложной геометрии, компьютерное моделирование. *Контактная информация:* e-mail: tupikova_em@rudn.university

Журбин Юлиан Викторович — магистрант департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* компьютерное моделирование, расчеты строительных конструкций, зданий, сооружений и комплексов. *Контактная информация:* e-mail: julianzhurbin2015@gmail.com

NUMERICAL MODELING OF THE BUCKLING RESISTANCE OF RULED HELICOIDAL SHELLS

Gil-oulbe Mathieu, A.S. Markovich, E.M. Tupikova, Yu.V. Zhurbin

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

Abstract. The paper concerns the buckling analysis of thin shells of right helicoid form. The buckling analysis was performed by the means of finite element software. Shells with variable pitch number and

same contour radiuses and height were compared, their straight edges fixed and the curvilinear contours free. Was used for the analysis triangular shell finite elements (No. 42). The total number of nodal unknowns was the same in each of the considered tasks and was 16 206. Numerical investigation of the stability was performed by the finite element method in the software package Lira-SapR 2017. The number of nodes in each task was the same. The loading includes combination of gravity (dead load) and vertical equally distributed load. The buckling mode and stability factor for every case is calculated. Boundary conditions — elastic built in shells along the bottom and top generatrices. To plot the mid-surface of each shell were used parametric equations in rectangular coordinates. Of particular interest is the study of natural oscillations of the shells considered. To define the frequencies and forms of free vibrations is taken into account only the own weight of the helicoidal shells.

Key words: Buckling analysis of shells, load combination, helical shells, transverse shear, stress-strain state, right helicoid, shells of complex geometry, stability factor

REFERENCES

- [1] Krivoschapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopedia of analytic surfaces. Moscow: LIBROKOM, 2010. 560 p. (In Russ.)
- [2] Aleksandrov P.V., Nemirovsky Yu.V. Investigation of the stressed state of reinforced helicoidal shells. *Izvestiya Vuzov. Building.* 1994. No. 11. P. 48—55. (In Russ.)
- [3] Aleksandrov P.V., Nemirovsky Yu.V. Stress state of reinforced helicoidal shells. *Izvestiya Vuzov. Construction and architecture.* 1991. No. 9. P. 18—24. (In Russ.)
- [4] Czaplinski K., Marcinkowski Z., Swiecicki W. An analysis of stress in the combined structure of a spiral stairway // Eighth Cong. Mater. Fest. Budapest. 28 Sept.-1 Oct. 198. Lectures. Vol. 3. Budapest. 1982. 1003—1007.
- [5] Nedelchev V.V. Vita of the Plateau of the Stlba, Statically Podpryana in the Edge of Edge. *Building.* 1989. T. 36. № 5. P. 3—4. (Bulgarian).
- [6] Birger I.A. Spatial stress state in blades with initial twist // Tr. CIAM. 1982. No. 996. Pp. 7—23. (In Russ.)
- [7] Shorr B.F. Oscillations of swirling rods. *Izv. AS USSR. Mechanics and machine building.* 1961. No. 3. P. 35—39. (In Russ.)
- [8] Simmonds James G. General helicoidal shells undergoing large, one-dimensional strains or large inextentional deformations. *Int. J. Solids and Struct.* 1984. Vol. 20. No. 1. P. 13—30.
- [9] Simmonds James G. Surfaces with metric and curvature tensors that depend on one coordinate only are general helicoids. *Q. Appl. Math.* 1979. Vol. 37. P. 82—85.
- [10] Salman Abdallah A. Al-Duhheisat. Analytical and numerical approaches to the problem of static calculation of a thin helical shell with unfolding middle surface / Reconstruction of buildings and structures. Strengthening the foundations and foundations: Int. scientific and practical work. Conf. Penza: PGAASA. PVZ. 1999. P. 67—70. (In Russ.)
- [11] Krivoschapko S.N., Abdelsalam M.A. Methods analysis of helical shells in the form of torso-helicoids / Modern construction: Int. scientific — practical conference. Penza: PGAASA, PDZ, 1998. P. 105—107. (In Russ.)
- [12] Krivoschapko S.N. Application of the asymptotic method of small parameter for the analytical calculation of thin elastic torso-helicoids // Spatial structures of buildings and structures. Moscow: OOO "Nine Print" Publ., 2004. Issue. 9. P. 36—44. (In Russ.)
- [13] Mansfield E. On finite inextentional deformation of a helical strip. *Int. J. Non-linear Mech.* 1980. Vol. 15. No. 6. P. 459—467.
- [14] Meerson B. Theoretical study of the stress-strain state of the helical shell. Ufim. aviats. in-t, Ufa, 1988. 22 s., ill. Bibl. 6 names. (Manuscript of the Depot in VINITI on 12.07.88., No. 5593-B88). (In Russ.)
- [15] Salman Abdallah A. al-Duhheisat. Analytical and numerical approaches to the problem of static calculation of a thin helical shell with an unfolding middle surface // Reconstruction of buildings and structures. Strengthening the foundations and foundations: Int. scientific and practical work. Conf. Penza: PGAASA, PDZ, 1999. P. 67—70. (In Russ.)

- [16] Rynkovskaya M.I. Bending and the problem of calculating thin elastic shells in the form of a straight and unfolding helicoid on the distributed load and the draft of one of the curvilinear supports: diss. thesis. Moscow, 2013. 217 p. (In Russ.)
- [17] Mansfield E. On the finite non-uniform deformation of a spiral band. *Int. J. Nonlinear fur*. 1980. Vol. 15. No. 6. P. 459–467. (In Russ.)

Article history:

Date received: February 08, 2018

Date accepted: April 17, 2018

For citation:

Gil-oulbe Mathieu, Markovich A.S., Tupikova E. M., Zhurbin Yu.V. (2018). Numerical modeling of the buckling resistance of ruled helicoidal shells. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 203–213. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-203-213

Bio Note:

Gil-oulbe Mathieu — PhD civil engineering, Associate Professor, Department of architecture and civil engineering, Engineering Academy, RUDN University. *Research interests*: theory of thin elastic shells, nonlinear stability of shells of complex geometry, computer modeling. *Contact information*: e-mail:gil-oulbem@hotmail.com

Aleksei S. Markovich — PhD civil engineering, Associate Professor, Department of architecture and civil engineering, Engineering Academy, RUDN University. *Research interests*: construction mechanics, numerical methods for calculating structures, computer modeling. *Contact information*: e-mail: markovich.rudn@gmail.com

Evgeniya M. Tupikova — PhD civil engineering, Assistant Professor, Department of architecture and civil engineering, Engineering Academy, RUDN University. *Research interests*: theory of thin elastic shells, nonlinear stability of shells of complex geometry, computer modeling. *Contact information*: e-mail: tupikova_em@rudn.university

Yulian V. Zhurbin — Graduated from the Peoples' Friendship University of Russia in 2016 with a degree in "Construction Engineering and Technology". Currently studying in full-time magistracy in the specialty "Theory and design of buildings and structures". *Research interests*: computer modeling and analysis of building structures. *Contact information*: e-mail: julianzhurbin2015@gmail.com



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-214-227

УДК 624.012.4

НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЗВЕДЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ В НЕСЪЕМНОЙ ОПАЛУБКЕ ИЗ ЦЕМЕНТНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ

А.П. Свинцов¹, А.Р. Коэн², З.А. Бисиев³, И.Ю. Арсамаков³

¹ Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

² ООО «УК Генстрой»

Российская Федерация, 109147, Москва, ул. Малая Калитниковская, 7

³ ООО «Интергрупп»

Российская Федерация, 196158, Санкт-Петербург, литер А, Московское шоссе, 13

Использование несъемной опалубки из цементно-стружечных плит для возведения жилых зданий из монолитного железобетона является одним из эффективных методов современного строительства. В процессе производства строительной продукции, несмотря на жесткий контроль, в конструкциях возможно образование дефектов. В этой связи оценка надежности строительной технологической системы по показателям качества является актуальной задачей. Визуальное обследование строительных конструкций и инструментальное измерение выявленных дефектов выполнено на строительных объектах ООО «УК Генстрой». Это позволило обосновать оценку надежности строительной технологической системы, используемой при возведении жилых зданий из монолитного железобетона в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит. Математическая обработка количественных характеристик качественных параметров выполнена методами математической статистики с обеспеченностью $\alpha=0,95$. В результате исследования установлены наиболее часто встречающиеся дефекты строительных конструкций, возведенных с использованием несъемной опалубки из цементно-стружечных плит, а также выявлены причинно-следственные связи их образования. Вероятность одновременного невыполнения задания по параметрам качества хотя бы по одному признаку изменяется от $Q_{\min} = 0,082$ до $Q_{\max} = 0,161$ при среднем значении $Q_{\text{cp}} = 0,119$. Технологическим регламентом допустимо значение $Q_{\text{cp}} = 0,2$. В целом, строительная технологическая система возведения жилых зданий из монолитного железобетона в несъемной цементно-стружечной опалубке соответствует уровню надежности по параметрам качества, установленному проектной документацией.

Ключевые слова: опалубка, бетонная смесь, надежность, качество

Введение

Возведение жилых зданий из монолитного железобетона с использованием несъемной цементно-стружечной опалубки является одним из эффективных методов строительства. В настоящее время среди всех отраслей строительство характеризуется самым высоким уровнем дефектности возводимых конструкций. В этой связи оценка надежности строительной технологической системы по параметрам качества является актуальной научно-технической задачей.

В научной периодической печати широко представлены результаты различных аспектов применения несъемной опалубки из цементно-стружечных плит. Однако ее надежность по показателям качества оказалась вне активного интереса специалистов России и других стран. Это сдерживает решение задач по обеспечению высокого качества продукции, производимой посредством строительной технологической системы возведения жилых зданий в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит.

В результате теоретического и экспериментального исследования выявлены наиболее часто образующиеся дефекты конструкций и установлены причинно-следственные связи их образования. На основе натурных обследований выполнена оценка надежности технологической системы по показателям качества возводимых конструкций.

Анализ состояния вопроса

Жилищное строительство характеризуется широким применением современных строительных технологических систем. Производство бетонных работ на строительной площадке начинается с проектирования и выбора опалубки. Это позволяет обеспечить оптимизацию производства работ, повысить качество конструкций и эффективно использовать опалубку [1]. В монолитном строительстве жилых зданий одним из наиболее эффективных методов является возведение конструкций в несъемной опалубке. В России доля монолитного строительства в несъемной опалубке составляет 8,7% [2]. С учетом особенностей возводимых конструкций применяют несъемную опалубку из армированных, облицовочных, магнезитовых панелей, полистирольных блоков, цементно-стружечных плит и др.

Применение несъемной опалубки позволяет существенно сократить стоимость и сроки строительства, а также значительно уменьшить эксплуатационные затраты. При этом снижение затрат на отделочные работы составляет 35–60% [3]. По сравнению со сборным строительством возведение в несъемной опалубке имеет преимущества: по капитальным вложениям в производственную базу — на 60%, по энергоемкости производства строительной продукции — на 30%, по расходу цемента и арматуры в несущих конструкциях — на 20% [4; 5].

Несъемная опалубка значительно сокращает трудоемкость производства работ при возведении стен и перекрытий из монолитного железобетона [6]. При этом важным достоинством указанной технологической системы является минимальная потребность в строительной технике большой грузоподъемности.

Технологическая система возведения монолитных зданий в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит получила широкое распространение в жилищном строительстве. В малоэтажном строительстве продолжительность возведения отдельно стоящего дома общей площадью 100–250 м² составляет 2–3 месяца [7].

Технико-экономическое исследование, результаты которого представлены в [8; 9], позволило полагать, что применение несъемной опалубки из цементно-стружечных плит рационально при возведении зданий средней этажности — от

3 до 5 этажей. Использование этой технологической системы при многоэтажном строительстве не менее эффективно, чем в малоэтажном. В сравнении с кирпичным вариантом домостроения снижаются сроки возведения зданий в 1,5–2 раза, себестоимость уменьшается на 20–30%, а затраты на энергообеспечение при эксплуатации сокращаются до 30% [4].

Несмотря на техническую и экономическую эффективность возведения монолитных зданий, в том числе и в несъемной опалубке, образование производственного брака полностью исключить невозможно. Несъемная опалубка, выполненная из сверхвысокопрочного цементного композита, допускает образование трещин с шириной раскрытия до 0,45 мм. Трещины вызваны расслоением цементной матрицы опалубки, что уменьшает несущую способность конструктивных элементов [10]. На реализацию любого технологического процесса оказывает влияние множество факторов, которые не всегда поддаются регулированию и управлению.

Основные проблемы, возникающие при возведении монолитных железобетонных конструкций, обусловлены особенностями укладки и уплотнения бетонной смеси, а также ее воздействием на цементно-стружечные панели щитов несъемной опалубки [11].

В общем количестве дефектов, возникающих в процессе реализации технологического процесса, наибольшее значение имеют ошибки, связанные с человеческим фактором [12–14]. Дефекты строительных конструкций, возникающие в процессе их возведения, служат основной причиной, обуславливающей около 60% аварий в строительстве [15]. Строительный брак повышает вероятность возникновения аварий в 10 раз по сравнению с проектными данными [16]. Контроль качества бетона и бетонной опалубки посредством мониторинга с использованием интеграционной среды позволяет обеспечить безопасность производства работ при строительстве [17].

Анализ показателей надежности строительных технологических систем говорит о том, что одним из наиболее эффективных методов ее повышения является организация ритмичной работы, исключение простоев и непредвиденных отказов [18; 19]. В результате анализа эмпирических моделей, описывающих вероятностные процессы функционирования технологических систем, установлена статистически значимая экономическая связь между устойчивостью реализации производства и надежностью технологической системы [20]. В целом, технологическая система возведения монолитных железобетонных зданий в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит признана эффективной в техническом, экономическом и энергетическом аспектах. Исследования российских и зарубежных специалистов показывают, что указанная строительная технологическая система позволяет решать важную научно-техническую задачу повышения энергетической и экономической эффективности современного строительства.

Однако в настоящее время вопросы оценки надежности строительных технологических систем исследованы недостаточно. Это сдерживает эффективное решение задач по уменьшению дефективности строительства зданий из монолитного железобетона с применением несъемной опалубки.

Методы исследования и измерительные приборы

Производственные исследования надежности строительной технологической системы выполнены на строительных площадках ООО «УК Генстрой». Камеральные исследования, математическая обработка и научный анализ данных выполнены в Российском университете дружбы народов.

При исследовании использовались следующие методы: визуальный осмотр возведенных конструкций; инструментальные измерения выявленных дефектов; обобщение данных дефектных ведомостей и результатов инструментальных измерений; статистическая обработка количественных параметров, характеризующих дефекты по их видам; оценка надежности технологической системы по показателям качества.

Визуальное обследование возведенных конструкций выполнено для выявления дефектов, образовавшихся в процессе реализации технологических процессов. Визуальное обследование выполнено в дневное время суток при естественном освещении, а при необходимости использована локальная подсветка. При визуальном обследовании использована фотофиксация типичных и наиболее значимых дефектов.

Инструментальные измерения выполнены для получения количественных данных, характеризующих образовавшиеся дефекты в процессе реализации технологических процессов. Для непосредственного измерения использованы следующие инструменты и приборы: металлическая линейка длиной $l_l = 30$ см с ценой деления 1 мм; мерная лента (рулетка) длиной $l_p = 5$ м с ценой деления 1 мм; угольник строительный с ценой деления 1 мм; измеритель времени распространения звука «Пульсар-1.1»; правило-уровень длиной $l_n = 2,5$ м.

При исследовании использован опытно-статистический метод оценки показателей надежности строительной технологической системы. Опытно-статистические методы основаны на использовании данных непосредственных измерений параметров качества строительных конструкций (рис. 1).

На конструкциях с выявленными дефектами выполнены инструментальные измерения следующих параметров:

— длина трещин, ширина их раскрытия и глубина развития;



а



б

Рис. 1. Инструментальные измерения образовавшихся дефектов: а — сквозная трещина в щите опалубки; б — выпуклость вертикальной конструкции
[Fig. 1. Instrumental measurements of the formed defects: а — through crack in formwork panel; б — convex curvature of vertical structure]

- длина, ширина и наибольшая глубина сколов щитов опалубки;
- объемная деформация конструкций;
- адгезия щитов цементно-стружечной опалубки к бетону;
- размеры расслоения щитов опалубки.

Обобщение данных визуального обследования и инструментальных измерений выполнено на основе классификации качественных признаков и количественных характеристик дефектов.

Математическая обработка полученных данных выполнена по известным методикам теории вероятности и математической статистики с определением средних значений, стандартных отклонений и доверительных интервалов с обеспеченностью $\alpha = 0,05$.

Оценка надежности строительной технологической системы выполнена на основе определения и оценки вероятности выполнения задания (вероятности безотказной работы) по параметрам качества. Оценка технологической системы по параметрам качества выполнена с условием вероятности выхода одного из показателей качества изготовленной продукции за пределы, установленные в конструкторской и технологической документации. В соответствии с ГОСТ 27.202-83 в общем виде вероятность выполнения задания по j -му показателю качества произведена по формуле

$$P_j(t) = \frac{N - n_j(t)}{N}, \quad (1)$$

где $n_j(t)$ — количество элементов, изготовленных с дефектом контролируемого параметра; N — количество обследованных строительных конструкций по j -му параметру качества; t — параметр качества возведенной конструкции (трещина, скол опалубки и др.).

Оценка вероятности невыполнения задания одновременно по k параметрам качества произведена по формуле

$$Q_{1...k}(t) = 1 - P_j(t). \quad (2)$$

Для дефектов монолитных железобетонных конструкций, возводимых в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит, характерно нормальное распределение. В соответствии с ГОСТ 27.202—83 доверительный интервал определен по плану:

$$P\left(\bar{x} - \frac{t_\gamma S}{\sqrt{n}} < a < \bar{x} + \frac{t_\gamma S}{\sqrt{n}}\right) = \gamma, \quad (3)$$

где t_γ — квантиль распределения Стьюдента, определяемый для заданной доверительной вероятности γ , зависящий от уровня значимости $\alpha = 1 - \gamma$ и числа степеней свободы $k = n - 1$; S — среднее квадратическое отклонение по выборке.

Исследуемый параметр a подчиняется нормальному закону распределения, и его доверительный интервал определен по формуле

$$I_s = \left(S \sqrt{\frac{n-1}{\chi_1^2}} < s < S \sqrt{\frac{n-1}{\chi_2^2}} \right), \quad (4)$$

где χ_1^2, χ_2^2 — значения критерия согласия Пирсона, определяемые в зависимости от вероятности P и числа степеней свободы $k = n - 1$.

Вероятность P определяется по формуле

$$P = \begin{cases} \frac{1-\gamma}{2} & \text{для } \chi_1^2 \\ 1 - \frac{1-\gamma}{2} & \text{для } \chi_2^2 \end{cases}, \quad (5)$$

где γ — доверительная вероятность, принимаемая в зависимости от уровня требований, предъявляемых к качеству строительной продукции.

Использование указанных методов исследования и измерительных приборов позволило получить достоверные данные и статистически значимые результаты, характеризующие надежность строительной технологической системы возведения жилых зданий из монолитного железобетона в несъемной цементно-стружечной опалубке.

Результаты и их обсуждение

Строительная технологическая система возведения зданий с использованием несъемной опалубки из цементно-стружечных плит, применяемая строительной компанией ООО «УК Генстрой», является одной из разновидностей монолитного домостроения. Система несъемной опалубки состоит из щитов, выполненных из цементно-стружечных плит толщиной 24 мм, соединенных между собой стальными элементами. Блоки несъемной опалубки поступают на строительную площадку, где их устанавливают в проектное положение (рис. 2). После установки, соединения и закрепления блоков стен и перекрытий в узлы их заполняют бетонной смесью с уплотнением и выдерживанием в соответствии с технологическим регламентом.

При реализации технологических процессов в полном соответствии с технологическими регламентами возведенные конструкции готовы к внутренним санитарно-техническим, электротехническим и отделочным работам. При этом в мокрых штукатурных работах нет необходимости. Поверхности конструкций сразу готовы к оклейке обоями или покраске.

На строительную технологическую систему оказывает влияние множество случайных и неуправляемых факторов. Реализация технологических процессов любой технологической системы не исключает возникновения дефектов на возведенных конструкциях и элементах. Несмотря на жесткий контроль за выполнением технологических процессов, полностью исключить образование брака невозможно. Тем не менее задача повышения надежности технологической системы по параметрам качества является важной и актуальной задачей строительства.



Рис. 2. Несъемная опалубка в рабочем положении
[**Fig. 2.** Stay-in-place formwork in position]

В результате визуального обследования конструкций и инструментальных измерений выявлены следующие дефекты:

- расхождение стыков цементно-стружечных плит опалубки стен и потолков;
- сквозная вертикальная трещина в цементно-стружечной плите на всю ее высоту с шириной раскрытия 12 мм;
- несквозная наклонная трещина с неравномерным по длине раскрытием, составляющим от менее 1 мм до 8 мм;
- несквозная вертикальная трещина в цементно-стружечной плите на всю ее высоту с шириной раскрытия до 9 мм;
- сквозная вертикальная трещина в цементно-стружечной плите с протяженностью меньше, чем ее высота, с шириной раскрытия до 7 мм;
- сквозная одиночная наклонная трещина с неравномерным по длине раскрытием до 6 мм;
- выпуклость вертикальной конструкции.

На рисунке 3 представлены фрагменты вертикальных конструкций с трещинами в цементно-стружечной панели опалубки.

В результате визуального осмотра конструкции установлено, что выпуклости стены видны без инструментальных измерений. При этом ультразвуковым обследованием нарушение адгезии бетона к щитам опалубки не выявлено.

Анализ результатов визуального обследования и инструментальных измерений позволил выявить причинно-следственные связи образования дефектов возведенных строительных конструкций.

Сквозная и несквозная вертикальные трещины в щите опалубки из цементно-стружечной плиты образованы в результате проявления скрытых дефектов. Скрытые дефекты щитов опалубки образованы вне реализации технологических процессов и, как правило, вне строительной площадки. Наиболее вероятные причина образования указанных трещин — возникновение микротрещин в теле

цементно-стружечной плиты в результате внешнего механического воздействия (удара, изгиба и др.) при складировании, транспортировке или изготовлении блоков несъемной опалубки. В процессе укладки и уплотнения бетонной смеси в построечных условиях возрастает механическая нагрузка на щиты опалубки, что приводит к развитию скрытых микротрещин в сквозные и несквозные трещины, длина которых, как правило, равна размеру панели. Более точно причинно-следственные связи можно будет установить в результате дополнительных исследований логической цепочки технологической системы в целом.

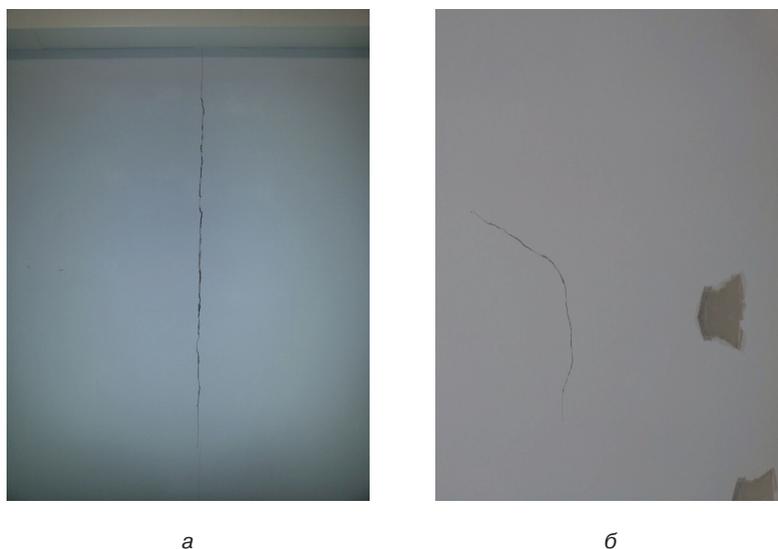


Рис. 3. Трещины в щитах опалубки: а — сквозная вертикальная трещина на всю высоту панели; б — несквозная наклонная трещина в цементно-стружечной панели опалубки
[**Fig. 3.** Cracks in formwork panels: a — through vertical crack to the full height of the panel; б — part-through inclined crack in the cement boards of the formwork]

Наклонные трещины в щитах цементно-стружечной опалубки и выпуклости в возведенных конструкциях образованы из-за повышенных нагрузок распора при укладке и уплотнении бетонной смеси на строительной площадке. Установлено, что нарушение технологического регламента укладки бетонной смеси, приводящее к нарушению геометрических параметров возводимых конструкций, наиболее часто происходит при использовании бетононасосов. При укладке бетонной смеси по схеме «кран—бадья» образование выпуклостей на конструкциях не выявлено.

Анализ дефектных ведомостей и протоколов обследования показывает, что выявленные дефекты не являются критическими и не влияют на безопасность эксплуатации здания. В то же время выявленные дефекты подлежат устранению, что является дополнительной работой, увеличивающей себестоимость продукции.

В результате выполненного исследования установлено, что вероятность выполнения задания по параметрам качества реализации технологических процессов изменяется:

— по расхождению стыков цементно-стружечных плит опалубки от $P_{\min}^j = 0,821$ до $P_{\max}^j = 0,917$ при среднем значении $P_{\text{cp}}^j = 0,872$;

— образованию продольных и поперечных трещин на весь размер цементно-стружечной панели от $P_{\min}^{in} = 0,839$ до $P_{\max}^{in} = 0,911$ при среднем значении $P_{\text{ср}}^{in} = 0,870$;

— образованию наклонных трещин в цементно-стружечной панели опалубки от $P_{\min}^l = 0,815$ до $P_{\max}^l = 0,910$ при среднем значении $P_{\text{ср}}^l = 0,867$;

— образованию выпуклостей на поверхностях возведенных конструкций от $P_{\min}^v = 0,881$ до $P_{\max}^v = 0,931$ при среднем значении $P_{\text{ср}}^v = 0,904$.

Вероятность одновременного невыполнения задания по параметрам качества хотя бы по одному признаку изменяется от $Q_{\min} = 0,082$ до $Q_{\max} = 0,161$ при среднем значении $Q_{\text{ср}} = 0,119$. При этом максимальное значение технологического отказа приходится на дефекты внеплощадочного первообразования.

Анализ результатов визуального обследования конструкций, инструментального измерения выявленных дефектов и математическая обработка их численных характеристик показывает, что строительная технологическая система возведения зданий из монолитного железобетона с использованием несъемной опалубки из цементно-стружечных плит соответствует предусмотренному технологическим регламентом уровню надежности по параметрам качества.

Заключение

Повышение качества строительных конструкций жилых зданий является одной из важнейших задач современного строительства. В связи с этим оценка надежности строительной технологической системы возведения жилых зданий из монолитного железобетона является актуальной задачей.

В результате натурных обследований возведенных строительных конструкций и инструментальных измерений установлено:

1) наиболее часто образуются следующие дефекты: продольные сквозные трещины в щитах цементно-стружечной опалубки с шириной раскрытия до 12 мм; наклонные несквозные трещины в щитах опалубки с шириной раскрытия от 1 мм до 8 мм; выпуклость вертикальной конструкции;

2) сквозные трещины в щитах опалубки образуются как развитие микротрещин, возникших в результате механического воздействия вне реализации технологического процесса по укладке и уплотнению бетонной смеси;

3) наклонные трещины в щитах опалубки и выпуклости в конструкциях образуются в процессе уплотнения бетонной смеси с нарушением технологических регламентов при использовании бетононасосов для ее укладки;

4) вероятность одновременного невыполнения задания по параметрам качества хотя бы по одному признаку изменяется от $Q_{\min} = 0,082$ до $Q_{\max} = 0,161$ при среднем значении $Q_{\text{ср}} = 0,119$; технологическим регламентом допустимо значение $Q_{\text{ср}} = 0,2$;

5) в целом, строительная технологическая система возведения жилых зданий из монолитного железобетона в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит характеризуется как соответствующая заданному уровню надежности по параметрам качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Krawczyńska-Piechna A.* Comprehensive Approach to Efficient Planning of Formwork Utilization on the Construction Site // *Procedia Engineering*. 2017. V. 182. Pp. 366–372. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.114>
- [2] *Абрамян С.Г., Ахмедов А.М., Халилов В.С., Уманцев Д.А.* Развитие монолитного строительства и современные опалубочные системы // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2014. № 36 (55). С. 231–239.
- [3] *Рязанова Г.Н., Камбург В.Г.* Моделирование технологии возведения самонесущих ограждающих конструкций из крупнопористого керамзитобетона в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит // *Региональная архитектура и строительство*. 2009. № 1. С. 74–78.
- [4] *Рязанова Г.Н., Баранова Т.И., Ткаченко А.Н.* Инвестиционно привлекательные технологии возведения теплоэффективной ограждающей конструкции в несъемной опалубке // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2008. № 2. С. 86–93.
- [5] *Рязанова Г.Н., Камбург В.Г.* Совершенствование технологии возведения ограждающих конструкций в несъемной опалубке. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2010. 167 с.
- [6] *Scott B., Wahab N., Al-Mayah A., Soudki K.A.* Effect of stay-in-place PVC formwork panel geometry on flexural behavior of reinforced concrete walls. *Structures*. 2016. V. 5. P. 123–130.
- [7] *Сахаров Г.П., Стрельбицкий В.П.* Материалы и технологии в малоэтажном строительстве // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2012. № 5 (160). С. 22–27.
- [8] *Девятникова Л.А., Емельянова Е.Г., Кузьменков А.А., Симонова А.А.* Исследование технико-экономических параметров при выборе технологии возведения ограждающих конструкций индивидуальных жилых домов // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2015. № 4 (149). С. 82–89.
- [9] *Андреев А.А., Колесников Г.Н.* Совершенствование технологии использования отходов лесопильных предприятий в производстве древесно-цементных материалов для малоэтажного строительства // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 68 (часть 6). С. 1139–1143.
- [10] *Huang Bo-Tao, Li Qing-Hua, Xu Shi-Lang, Li Chen-Fei.* Development of reinforced ultra-high toughness cementitious composite permanentformwork: Experimental study and Digital Image Correlation analysis. *CompositeStructures*. 2017. V. 180. Pp. 892–903. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.016>
- [11] *Рязанова Г.Н., Камбург В.Г.* Описание и модельный подход в технологии возведения самонесущих ограждающих конструкций из крупнопористого керамзитобетона в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит // *Вестник Хмельницкого национального университета*. Технические науки. 2014. № 3 (213). С. 183–187.
- [12] *Тамразян А.Г., Булгаков С.Н., Рахман И.А., Степанов А.Ю.* Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. М.: Изд-во АСВ, 2012. 297 с.
- [13] *Kh. Makhmud, Svintsov A.P.* Reliability of technological systems of building construction in permanent EPS formwork // *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2017. V. 4. I. 11. Pp. 94–98. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2017.011.014>
- [14] *Свинцов А.П., Панин О.В.* Надежность технологической системы возведения монолитных железобетонных стен // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2011. № 2. С. 43–47.
- [15] *Байбурин А.Х.* Обеспечение качества и безопасности возводимых гражданских зданий. М.: АСВ, 2015. 335 с.
- [16] *Байбурин А.Х.* Оценка вероятности аварии с учетом ошибок участников строительства // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Т. 15. № 1. С. 10–13.

- [17] Moon S., Choi E., Yang B. Holistic integration based on USN technology for monitoring safety during concrete placement. *Automation in Construction*. 2015. V. 57. Pp. 112—119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.05.001>
- [18] *Абдуллаев Г.И.* Основные направления повышения надежности строительных процессов // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. № 4. С. 59—60.
- [19] *Nazarko L.* Technology Assessment in Construction Sector as a towards Sustainability. *Procedia Engineering*. 2015. V. 122. Pp. 290—295.
- [20] *Nightingale P.* Technological capabilities, invisible infrastructure and the un-social construction of predictability: the overlooked fixed costs of useful research. *Research Policy*. 2004. V. 33. I. 9. Pp. 1259—1284.

© Свинцов А.П., Коэн А.Р., Бисиев З.А., Арсамаков И.Ю., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 15 ноября 2017

Дата принятия к печати: 10 апреля 2018

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по Программе повышения конкурентоспособности РУДН «5-100» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2016—2020 гг.

Для цитирования:

Свинцов А.П., Коэн А.Р., Бисиев З.А., Арсамаков И.Ю. Надежность технологической системы возведения жилых зданий в несъемной опалубке из цементно-стружечных плит // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования.* 2018. Т. 19. № 2. С. 214—227. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-214-227

Сведения об авторах:

Свинцов Александр Петрович — профессор, доктор технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* теория и практика организационно-технологических, экономических решений в строительстве и инженерном оборудовании. *Контактная информация:* e-mail: svintsovap@rambler.ru

Коэн Арсений Романович — кандидат технических наук, генеральный директор ООО «УК Генстрой». *Область научных интересов:* организация строительного производства. *Контактная информация:* e-mail: Arkoen@if-capital.ru

Бисиев Зураб Алиевич — генеральный директор ООО «Интергрупп». *Область научных интересов:* организация строительного производства. *Контактная информация:* e-mail: ZABisiev@if-capital.ru

Арсамаков Ибрагим Юсупович — заместитель генерального директора ООО «Интергрупп». *Область научных интересов:* организация строительного производства. *Контактная информация:* e-mail: IYArsamakov@if-capital.ru

RELIABILITY OF CONSTRUCTING RESIDENTIAL BUILDINGS USING STAY-IN-PLACE CEMENT BOARD FORMING TECHNOLOGY

A.P. Svintsov¹, A.R. Koen², Z.A. Bisiev³, I.Y. Arsamakov³

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

² LLC "UK Genstroy"
7, Malaya Kalitnikovskaya str., Moscow, 109147, Russian Federation

³ LLC "Inter Group"
13, Moscow highway, l. A, Saint-Petersburg, 196158, Russian Federation

Abstract. Using stay-in-place cement board forms for construction of residential buildings of reinforced concrete is one of the effective methods of modern construction. In the process of production of construction materials despite tight control some defects in structures may form. In this regard, the reliability assessment of the construction technology in terms of quality is an essential task. To assess the reliability of the construction technology the methods of visual examination of building structures and instrumental measurement of detected defects were used. Mathematical processing of the quantitative characteristics of the qualitative parameters is performed by methods of mathematical statistics with the confidence $\alpha = 0,95$. The study established the most common defects of building structures erected with the stay-in-place cement board forms, as well as identified the cause-and-effect relationships of their formation. The probability of simultaneous failure of the task by the quality parameters of at least one characteristic varies from $Q_{\min} = 0,082$ to $Q_{\max} = 0,161$ with the average value $Q_{cp} = 0,119$, the admissible value specified in building code being $Q_{\min} = 0,2$. Overall, the technology of constructing reinforced concrete residential buildings with stay-in-place cement board forms corresponds to the level of reliability according to the quality parameters set by the project documentation.

Key words: formwork, concrete mix, reliability, quality

REFERENCES

- [1] Krawczyńska-Piechna A. Comprehensive Approach to Efficient Planning of Formwork Utilization on the Construction Site. *Procedia Engineering*. 2017. V. 182. P. 366–372. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.114>
- [2] Abramjan S.G., Ahmedov A.M., Halilov V.S., Umancev D.A. Razvitie monolitnogo stroitel'stva i sovremennye opalubochnye sistemy. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2014. No. 36 (55). P. 231–239. (in Russ.)
- [3] Rjazanova G.N., Kamburg V.G. Modelirovanie tekhnologii vozvedeniya samonesushchikh ograzhdayushchikh konstruksii iz krupnoporistogo keramzitobetona v nes'emnoi opalubke iz tsementno-struzhechnykh plit. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2009. No. 1. P. 74–78. (in Russ.)
- [4] Rjazanova G.N., Baranova T.I., Tkachenko A.N. Investitsionno privlekatel'nye tekhnologii vozvedeniya teploeffektivnoi ograzhdayushchei konstruksii v nes'emnoi opalubke. *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury*. 2008. No. 2. P. 86–93. (in Russ.)
- [5] Rjazanova G.N., Kamburg V.G. Sovershenstvovanie tekhnologii vozvedeniya ograzhdayushchikh konstruksii v nes'emnoi opalubke. Penza: PGUAS Publ., 2010. 167 p. (in Russ.)
- [6] Scott B., Wahab N., Al-Mayah A., Soudki K.A. Effect of stay-in-place PVC formwork panel geometry on flexural behavior of reinforced concrete walls. *Structures*. 2016. V. 5. P. 123–130.
- [7] Saharov G.P., Strel'bickij V.P. Materialy i tekhnologii v malojetazhnom stroitel'stve. *Construction materials, the equipment, technologies of XXI century*. 2012. No. 5 (160). P. 22–27. (in Russ.)

- [8] Devjatnikova L.A., Emel'janova E.G., Kuz'menkov A.A., Simonova A.A. Issledovanie tehniko-jekonomicheskikh parametrov pri vybore tehnologii vozvedeniya ogradhdajushhih konstrukcij individual'nyh zhilyh domov. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. No. 4 (149). P. 82—89. (in Russ.)
- [9] Andreev A.A., Kolesnikov G.N. Sovershenstvovanie tehnologii ispol'zovaniya othodov lesopil'nyh predpriyatij v proizvodstve drevесno-cementnyh materialov dlja malojetazhnogo stroitel'stva. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2014. No. 68 (6). P. 1139—1143. (in Russ.)
- [10] Huang Bo-Tao, Li Qing-Hua, Xu Shi-Lang, Li Chen-Fei. Development of reinforced ultra-high toughness cementitious composite permanent formwork: Experimental study and Digital Image Correlation analysis. *Composite Structures*. 2017. V. 180. P. 892—903. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.016>.
- [11] Rjanzanova G.N., Kamburg V.G. Opisaniye i model'nyi podkhod v tekhnologii vozvedeniya samonesushchikh ogradhdajushchikh konstruksii iz krupnoporistogo keramzitobetona v nes'memnoi opalubke iz tsementno-struzhechnykh plit. *Vestnik Hmel'nickogo nacional'nogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 2014. No. 3 (213). P. 183—187. (in Russ.)
- [12] Tamrazjan A.G., Bulgakov S.N., Rahman I.A., Stepanov A.Ju. Snizhenie riskov v stroitel'stve pri chrezvychajnyh situacijah prirodnoho i tehnogennogo haraktera. Moscow: ASV Publ., 2012. 297 p. (in Russ.)
- [13] Kh. Makhmud, Svintsov A.P. Reliability of technological systems of building construction in permanent EPS formwork. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2017. V. 4. I. 11. Pp. 94—98. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2017.011.014>
- [14] Svintsov A.P., Panin O.V. Nadezhnost' tehnologicheskoy sistemy vozvedeniya monolitnyh zhelezobetonnyh sten. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2011. No. 2. P. 43—47. (in Russ.)
- [15] Bajburin A.Kh. Obespechenie kachestva i bezopasnosti vozvodimyh grazhdanskih zdaniy. Moscow: ASV Publ., 2015. 335 p. (in Russ.)
- [16] Bajburin A.Kh. Construction accident ts probability estimate taking into account errors of construction participants. *Bulletin of the South Ural State University Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2015. Vol. 15. No. 1. P. 10—13. (in Russ.)
- [17] Moon S., Choi E., Yang B. Holistic integration based on USN technology for monitoring safety during concrete placement. *Automation in Construction*. 2015. V. 57. P. 112—119. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.05.001>
- [18] Abdullayev G.I. The main directions of building processes reliability improving. *Magazine of civil engineering*. 2010. No. 4(14). P. 59—60. (in Russ.)
- [19] Nazarko L. Technology Assessment in Construction Sector as a towards Sustainability. *Procedia Engineering*. 2015. V. 122. P. 290—295.
- [20] Nightingale P. Technological capabilities, invisible infrastructure and the un-social construction of predictability: the overlooked fixed costs of useful research. *Research Policy*. 2004. V. 33. No. 9. P. 1259—1284.

Article history:

Received: November 15, 2017

Accepted: April 10, 2018

The research was conducted with financial support from Ministry of Education and Science of the Russian Federation through Project 5-100 of improving academic status of RUDN University among the leading educational centres in the world over 2016—2020 period.

For citation:

Svintsov A.P., Koen A.R., Bisiev Z.A., Arsamakov I.Y. (2018). Reliability of constructing residential buildings using stay-in-place cement board forming technology. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 214—227. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-214-227

Bio not:

Alexander P. Svintsov — Professor, Doctor of Science, Professor of the Department of Architecture & Civil Engineering, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). *Research interests:* theory and practice of organizational-technological and economic solutions in construction and engineering equipment. *Contact information:* e-mail: svintsovap@rambler.ru

Arseny Koen — Candidate of Science, CEO LLC “UK Genstroy”. *Research interests:* construction management. *Contact information:* e-mail: Arkoen@if-capital.ru

Zurab Bisiev — Founder & CEO LLC “InterGroup”. *Research interests:* construction management. *Contact information:* e-mail: ZABisiev@if-capital.ru

Ibrahim Arsamakov — Deputy CEO LLC “InterGroup”. *Research interests:* construction management. *Contact information:* e-mail: IYArsamakov@if-capital.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-228-234

УДК 504.4

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОБОРУДОВАНИЯ, СНИЖАЮЩЕГО ВРЕДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Е.К. Синиченко¹, И.И. Грицук^{1,2,3}, Л.Е. Щесняк¹

¹ Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

² Институт водных проблем РАН (ИВП РАН)

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

³ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64

Развитие трубопроводных систем и создание новых схем с включением дополнительного оборудования предъявляют высокие требования к безопасности и безотказности работы нагнетающих установок, насосных станций, а также к элементам трубопроводов, отвечающих за своевременную защиту системы в случае возникновения экстренных ситуаций. Практика эксплуатации длинных и коротких трубопроводов показывает, что колебания давления и расхода, вызываемые работой нагнетательных установок, а также перегрузки ударного характера, вызываемые, в частности, срабатыванием запорных элементов, являются причиной воздействия на трубопровод дополнительных динамических нагрузок, что может привести к авариям и катастрофам с тяжелыми последствиями, человеческими жертвами. Во время переходного процесса в отдельных сечениях трубопровода, особенно на входе и выходе нагнетательной установки, изменение давления может быть столь резким, что возможно разрушение стенок трубопровода. Поэтому проблема создания эффективных средств гашения волновых процессов и гидравлических ударов не теряет актуальности на протяжении многих десятилетий. В статье кратко описана история развития методов расчета неустановившегося движения вязкой и сжимаемой жидкости. Обозначены основные проблемы, возникающие в практике эксплуатации гидравлических систем, включающих различные виды оборудования, необходимого для надежного функционирования систем. Приведены ссылки на статьи, в которых дается анализ различных аспектов, связанных с данной тематикой.

Ключевые слова: трубопроводные системы, стабилизатор давления, гидроудар

Введение

Расчетами, связанными с неустановившимся движением жидкости и гидравлическим ударом в частности ученые занимаются уже достаточно давно. Первые серьезные исследования движения жидкости в трубопроводах, расчеты гидравлического удара связаны с именем Н.Е. Жуковского [1]. Им были выведены дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости, а также разработаны способы снижения скачков давления с помощью воздушного колпака [2].

Теория расчета неустановившегося движения вязкой и сжимаемой жидкости в трубах была разработана И.А. Чарным [3]. Он ввел гипотезу квазистационар-

ности потока, а С.А. Христианович применил ее для вычисления неустановившегося течения в руслах. Идея гипотезы состоит в том, что сила трения жидкости о стенку трубы в нестационарном режиме принимается такой же, как и при стационарном течении со скоростью, равной мгновенной скорости рассматриваемого стационарного течения. Согласно И.А. Чарному, уравнения (движения и неразрывности) неустановившегося движения несжимаемой жидкости могут быть записаны в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho g z + p + \alpha \rho \frac{v^2}{2} \right) + \alpha' \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho \lambda}{2D} v |v| = 0, \quad [\text{Н/М}^3] \quad (1)$$

$$v \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad [\text{Н}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})], \quad (2)$$

где p — абсолютное гидродинамическое давление; v — средняя по живому сечению скорость; g — ускорение свободного падения; z — геометрическая высота; ρ — плотность жидкости; t — время; λ — коэффициент гидравлического трения по длине; D — диаметр трубопровода; c — скорость распространения волны давления; α и α' — коэффициенты Кориолиса и Бусинеска, принято, что $\alpha = \alpha' = 1$.

Современные тенденции

Развитие оборонной промышленности и формирование ракетных комплексов потребовали от ученых создания надежных систем, обеспечивающих равномерную подачу жидкого топлива от топливных баков к двигателям. Для решения этой задачи потребовалось развитие теории, описывающей работу различного оборудования при неустановившемся движении жидкости. Этой проблемой занимались А.П. Владиславлев, А.А. Козобков, В.А. Малышев, Р.Ф. Ганиев, Х.Н. Низамов [4] и др. Способы и средства защиты от колебаний давления в авиационных трубопроводах изложены в монографии В.А. Шорина [5], где описаны газожидкостные стабилизаторы емкостного типа, гасители типа параллельного резонансного контура и др. Продолжением исследований Р.Ф. Ганиева и Х.Н. Низамова являются работы Ф.В. Рекача (с соавт.) [7; 9; 11], в которых рассчитаны гидравлические схемы, включающие стабилизатор давления диссипативного принципа действия точными методами, а также проведен анализ допустимых динамических нагрузок на трубопровод. Изучению данной актуальной проблематики посвящены работы таких иностранных ученых, как А. Ismaier, E. Schlueker [12], Z. Liu, J. Jiang, X. Yang [13], M.R. Nikpour, A.H. Nazemi, A. Hosseinzadeh Dalir, F. Shoja, P. Varjaland [14], S. Henclik [15] и др.

С развитием вычислительной техники появляются новые возможности для расчета уже более сложных гидравлических схем, включающих различное инновационное оборудование. При этом имеется возможность исследовать параметры неустановившегося движения жидкости для определенных временных характеристик включения-выключения и срабатывания оборудования (насосных стан-

ций, запорной арматуры, стабилизаторов давления, сбрасывающих устройств и т.д.). Наибольшее развитие получил численный метод характеристик, позволяющий интегрировать квазилинейные гиперболические уравнения неустановившегося движения жидкости. Данный метод использует схему расчета, отличающуюся простотой и экономичностью с ограничением на шаг интегрирования (условие Куранта — Фридриха — Леви), и обеспечивает точность расчетов до 15%. Метод широко применяется для решения задач гидравлического удара в однофазной (а в дальнейшем и многофазной) жидкости в работах Д.А. Фокса [6] и др., и кратко описан в [8]. Для удобства расчетов в качестве основных характеристик потока принимается расход $Q = F \cdot v$ и абсолютный гидродинамический напор (выраженный в метрах водяного столба) $H = p/(\rho g)$. Вместо (1) и (2) получим:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(gFz + gFH + \frac{Q^2}{2F} \right) + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda}{2DF} Q|Q| = 0, \quad [\text{м}^3/\text{сек}^2] \quad (3)$$

$$\frac{Q}{F} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gF} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad [\text{м}/\text{сек}]. \quad (4)$$

Одним из актуальных направлений развития данной тематики для промышленных и гражданских гидравлических объектов является расчет длинных и коротких трубопроводов с включением в гидравлическую схему различного оборудования с заданными характеристиками работы. Значительное внимание учеными было уделено анализу и развитию стабилизаторов давления новых типов. Так, в работе [7] рассчитан стабилизатор давления, работающий при средних (от 2 до 5 МПа) и высоких (от 5 до 20 МПа) давлениях. Упругая камера (УК) является одним из основных элементов стабилизатора давления. Она представляет собой замкнутое объемное тело, которое при повышении давления уменьшает свой объем, а при понижении — увеличивает. Также в работе подробно описаны назначение и расчет стабилизатора давления при работе. Технические характеристики УК (рабочее давление, податливость, объем жидкости, вмещаемой камерой, химические и физические условия работы камеры и т.д.) определяют качество работы стабилизатора давления.

В статье [7] описан стабилизатор давления, который гасит вредные колебания в определенном диапазоне частот, проведен анализ эффективности работы оборудования при тех или иных условиях. Показано, что данный жесткий стабилизатор, разделяя поток жидкости, способен хорошо гасить колебательные частоты, на которые он рассчитывается. При этом он также уменьшает амплитуды колебаний в достаточно широком спектре частот. Работа [10] посвящена правильному подбору суммарной площади перфорационных отверстий для оптимального снижения гидроудара до 30% при оптимальном подборе перфорационных отверстий. В статье [11] исследуется неустановившееся движение жидкости при отключении центробежных насосов с разными моментами инерции и диаграммами Сьютера, а также анализируется влияние нарушения сплошности потока

жидкости на колебательный процесс в трубопроводе. В статье [10] разработано мембранно-сбрасывающее устройство, проведен расчет характеристик при возникновении в системе гидроудара, использована идея «демпфирующего» влияния протяженного участка трубопровода с низкой скоростью распространения волн повышенного давления на нежелательное повышение давления в системе. В статье [7] проведены вычисления упрощенной тепловой сети г. Нижнего Новгорода с точки зрения возникновения аварийных ситуаций. Рассмотрены случаи возможного отключения электроэнергии, вследствие чего срабатывает запорная арматура и возникают области распространения повышенного давления. В статьях [8; 9] представлены теоретические материалы, обобщающие опыт расчета трубопроводов с различными физическими характеристиками жидкости. В статье [10] рассчитаны эллиптические упругие камеры точными методами, а в [11] проведены вычисления сложной гидравлической системы, содержащей несколько колец. В дальнейшем авторами планируются численные эксперименты с включением в схемы различных видов оборудования и исследование их взаимодействия.

Заключение

Современные методы численного интегрирования позволяют достаточно точно описывать неустановившееся движение вязкой жидкости. В расчетах можно задавать физические и иные характеристики проектируемого или уже существующего оборудования с четким указанием временных факторов работы. Особенно это касается элементов запорной арматуры и способа пуска насосных агрегатов. Технический прогресс ставит новые проблемы, возникающие при эксплуатации гидравлических систем и оборудования, которые успешно решаются специалистами. В настоящий момент имеются отечественные (ZULU) и иностранные (голландская WANDA) программы численного расчета неустановившегося движения жидкости, помогающие моделировать и исследовать конкретные инженерные задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.—Л.: Гостехиздат, 1949. 103 с.
- [2] Жуковский Н.Е. Собрание сочинений. Т. 2: Гидродинамика. 763 с.; Т. 3: Гидравлика. Прикладная математика. 700 с. М.—Л.: Оборонгиз, 1949.
- [3] Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. 2-е изд. М.: Недра, 1975. 296 с.
- [4] Ганиев Р.Ф., Низамов Х.Н., Дербуков Е.И. Волновая стабилизация и предупреждение аварий в трубопроводах. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. 260 с.
- [5] Шорин В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. М.: Машиностроение, 1980. 155 с.
- [6] Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах / пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1981. 247 с.
- [7] Рекач Ф.В., Синиченко Е.К., Попов А.М. Расчет тепловой сети г. Нижнего Новгорода с точки зрения возникновения возможных аварийных ситуаций // Вестник Российского университета дружбы народов. 2013. № 3. С. 76—82.

- [8] Рекач Ф.В., Синиченко Е.К. Дифференциальные уравнения неустановившегося движения многофазной жидкости // Вестник Российского университета дружбы народов. 2014. № 3. С. 58—60.
- [9] Рекач Ф.В. Сравнение методов неустановившегося движения жидкости в круговых цилиндрических оболочках // Строительная механика конструкций и сооружений. 2015. № 4. С. 44—47.
- [10] Рекач Ф.В., Синиченко Е.К., Грицук И.И. Расчет точными методами стабилизатора давления с эллиптическими упругими камерами // Вестник Российского университета дружбы народов. 2016. № 1. С. 17—21.
- [11] Рекач Ф.В. Расчет неустановившегося движения в жидкости в круговых цилиндрических оболочках для сложной схемы, содержащей несколько колец // Строительная механика конструкций и сооружений. 2016. № 5. С. 75—79.
- [12] Ismaier A., Schluoker E. Fluid dynamic interaction between water hammer and centrifugal pumps, Nuclear Engineering and Design. 239 (2009). No. 12. 3151—3154.
- [13] Liu Z., Jiang J., Yang X. Research and instance analysis on joint water hammer protection of long-distance water supply system, Proceedings of the 6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering, Wuhan, China. 2014.
- [14] Nikpour M.R., Nazemi A.H., Hosseinzadeh Dalir A., Shoja F., Varjaland P. Experimental and numerical simulation of water hammer, Arabian Journal for Science and Engineering, 39 (2014). No. 4. 2669—2675.
- [15] Henclik S. The influence of elastic pipe supports and structural damping on water hammer with fluid-structure interaction, Proceedings of the 11th International Conferences on Pressure Surges, Lisbon, Portugal. 2012. С. 365—380.

© Синиченко Е.К., Грицук И.И., Щесняк Л.Е., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 15 января 2018

Дата принятия к печати: 28 апреля 2018

Для цитирования:

Синиченко Е.К., Грицук И.И., Щесняк Л.Е. Современные тенденции развития оборудования, снижающего вредные колебания давления в трубопроводных системах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 2. С. 228—234. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-228-234

Сведения об авторах:

Синиченко Евгений Константинович — кандидат технических наук, доцент департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология. *Контактная информация:* e-mail: sinichenko_ek@pfur.ru

Грицук Илья Игоревич — кандидат технических наук, доцент департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, старший научный сотрудник, Институт водных проблем РАН (ИВП РАН), доцент кафедры гидравлики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет. *Область научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология. *Контактная информация:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

Щесняк Леонид Евгеньевич — аспирант департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология. *Контактная информация:* e-mail: obeorne@mail.ru

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF EQUIPMENT REDUCING HARMFUL PRESSURE FLUCTUATIONS IN PIPING SYSTEMS

E.K. Sinichenko¹, I.I. Gritsuk^{1,2,3}, L.E. Shesnyak¹

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

² Russian Academy of Sciences Water Problems Institute (IWP RAS)
3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russian Federation

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

Abstract. The development of pipeline systems and the creation of new schemes, with the inclusion of additional equipment, poses high demands on the safety and reliability of the operation of injection plants, pumping stations, as well as on the elements of pipelines responsible for timely protection of the system in the event of emergency situations. The practice of operating long and short pipelines shows that fluctuations in pressure and flow caused by the operation of injection plants, as well as overloads of impact type, caused, in particular, by the operation of shut-off elements, result in additional dynamic loads on the pipeline, which can lead to accidents and catastrophes with severe consequences, human casualties. During the transient process in the individual sections of the pipeline, especially at the inlet and outlet of the injection plant, the pressure change can be so abrupt that it is possible to destroy the walls of the pipeline. Therefore, the problem of creating effective means of damping wave processes and hydraulic shocks has not lost its relevance for many decades. The article briefly describes the history of development of calculation methods of unsteady movement of a viscous and compressible fluid. The main problems are denoted in the practical operation of hydraulic systems, including various types of equipment. The references to articles which provide analysis of various aspects related to this subject are given.

Key words: piping systems, pressure stabilizer, water hammer

REFERENCES

- [1] Zhukovskij N.E. O gidravlicheskom udare v vodoprovodnykh trubakh [About hydraulic shock in water pipes]. M.; L.: Gostekhizdat Publ., 1949. 103 p. (In Russ.)
- [2] Zhukovskij N.E. Sbranie sochinenii. T. 2: Gidrodinamika. 763 s.; T. 3: Gidravlika. Prikladnaya matematika. [Collected Works. V. 2: Hydrodynamics. 763 p.; V. 3: Hydraulics. Applied Mathematics]. 700 p. M.; L.: Gostekhizdat Publ., 1949. (In Russ.)
- [3] Charnyy I.A. Neustanovivsheesya dvizhenie real'noi zhidkosti v trubakh [Unsteady motion of real liquid in pipes]. 2-nd edition. Moscow: Nedra Publ., 1975. 296 p. (In Russ.)
- [4] Ganiev R.F., Nizamov Kh.N., Derbukov E.I. Volnovaya stabilizatsiya i preduprezhdenie avarii v truboprovodakh [Wave stabilization and accident prevention in pipelines]. Moscow: Bauman Press Publ., 1996. 260 p. (In Russ.)
- [5] Shorin V.P. Ustranenie kolebaniy v aviatsionnykh truboprovodakh [Elimination of fluctuations in aircraft pipelines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 155 p. (In Russ.)
- [6] Foks D.A. Gidravlicheskiy analiz neustanovivshegosya techeniya v truboprovodakh [Hydraulic analysis of unsteady flow in pipelines] (trans. From English). Moscow: Energoizdat Publ., 1981. 247 p. (In Russ.)
- [7] Rekach F.V., Sinichenko E.K., Popov A.M. Analysis of heat-supply system of Nizhney Novgorod from the point of view of emergency situations occurrence. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2013. No. 3. P. 76–82. (In Russ.)

- [8] Rekach F.V., Sinichenko E.K. Differential equations of unsteady motion of multiphase liquid. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2014. No. 3. P. 58—60. (In Russ.)
- [9] Rekach F.V. Methods of comparison in analysis of unsteady liquid motion in circular cylindrical shells. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015. No. 4. P. 44—47. (In Russ.)
- [10] Rekach F.V., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Analysis of pressure stabilizer with elliptic chambers by exact method. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2016. No. 1. P. 17—21. (In Russ.)
- [11] Rekach F.V. Analysis of unsteady liquid motion in circular cylindrical shells for complex scheme including several rings. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016. No. 5. P. 75—79. (In Russ.)
- [12] Ismaier A., Schlueker E., Fluid dynamic interaction between water hammer and centrifugal pumps, *Nuclear Engineering and Design*. 239 (2009). No. 12. 3151—3154.
- [13] Liu Z., Jiang J., Yang X., Research and instance analysis on joint water hammer protection of long-distance water supply system, *Proceedings of the 6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering*, Wuhan, China, 2014.
- [14] Nikpour M.R., Nazemi A.H., Hosseinzadeh Dalir A., Shoja F., Varjaland P., Experimental and numerical simulation of water hammer, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (2014). No. 4. 2669—2675.
- [15] Henclik S., The influence of elastic pipe supports and structural damping on water hammer with fluid-structure interaction, *Proceedings of the 11th International Conferences on Pressure Surges*, Lisbon, Portugal, 2012. P. 365—380.

Article history:

Received: January 18, 2018

Accepted: April 28, 2018

For citation:

Sinichenko E.K., Gritsuk I.I., Shesnyak L.E. (2018). Modern trends in the development of equipment reducing harmful pressure fluctuations in piping systems. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 228—234. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-228-234

Bio Note:

Evgeniy K. Sinichenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering of the Academy of Engineering of Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* hydraulics, engineering hydrology. *Contact information:* e-mail: sinichenko_ek@pfur.ru

Ilya I. Gritsuk — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering of the Academy of Engineering of Peoples' Friendship University of Russia. Senior research associate, Russian Academy of Sciences Water Problems Institute (IWP RAS). Associate Professor at the Department of hydraulics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. *Research interests:* hydraulics, engineering hydrology. *Contact information:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

Leonid E. Shesnyak — post-graduate student of the Department of Architecture and Civil Engineering of the Academy of Engineering of Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* hydraulics, engineering hydrology. *Contact information:* e-mail: obeorne@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-235-245

УДК 622.2

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ КРЕПЛЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОГО ОКИСЛЕНИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУД НА ОРЛОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Ю.Н. Шапошник¹, А.И. Конурин¹, Д.А. Шокарев², С.Н. Шапошник³

¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН
Российская Федерация, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54

² ТОО ExpertPRO

Республика Казахстан, 070004, Усть-Каменогорск, ул. Протозанова А.К., 47

³ Восточно-Казахстанский государственный технический университет

Республика Казахстан, 070004, Усть-Каменогорск, ул. Протозанова А.К., 69

При проведении выработок в неустойчивых рудах и породах на Орловской шахте в качестве крепи используется металлические рамные крепи СВП-22 с накатником из круглого леса и забучиванием пустот закрепного пространства костровой крепью. При забучивании пустот костровой крепью вручную люди находятся в незакрепленной части выработки, в связи с чем данная операция является травмоопасной и трудоемкой. *Цель работы* — подобрать и испытать материал забутовки пустот закрепного пространства, обеспечивающий уменьшение диффузии и просачивание кислорода к очагам самовозгорания рудного массива в условиях интенсивного окисления сульфидных руд на Орловском месторождении. *Методы*. В рамках опытно-промышленных работ на Орловской шахте в качестве забутовки пустот закрепного пространства при креплении горных выработок металлической рамной крепью с накатником из круглого леса были испытаны вспенивающиеся негорючие материалы (фенольные двухкомпонентные смолы «Блокфил»). *Результаты*. Установлено, что применение в качестве забутовки закрепного пространства фенольной смолы позволит снизить интенсивность реакции окисления и предотвратить самонагревание руды до критических температур, а также предотвратить или замедлить процесс нагревания рудничного воздуха от разогретой поверхности рудного массива до температур, превышающих нормативные значения. *Выводы*. Применение в качестве забутовки пустот закрепного пространства фенольной смолой «Блокфил» обеспечило отсутствие деформаций элементов рамной металлической крепи и сохранность проводимой горной выработки, а также позволило снизить интенсивность реакции окисления и предотвратить самонагревание руды до критических температур и предотвратить или замедлить процесс нагревания рудничного воздуха от разогретой поверхности рудного массива до температур, превышающих нормативные значения.

Ключевые слова: подземная горная выработка, закрепное пространство, рамная крепь, динамические нагрузки, податливость крепи, забутовка, фенольная смола, вспененная глинистая пульпа

Орловское колчеданно-полиметаллическое месторождение, расположенное на востоке Казахстана, характеризуется сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями. Устойчивость пород резко понижается в зонах выветривания, тектонических нарушений и на участках гидротермального измене-

ния пород, мощность которых колеблется от нескольких метров до 100—150 м. Породы околорудных зон весьма неустойчивые из-за многочисленных разнонаправленных микротрещин, заполненных кальцитом, пиритом, и многочисленных зеркал скольжения. При обнажении, снятии больших нагрузок и увлажнении такие породы разуплотняются и обрушаются в горные выработки.

Руды месторождения относятся к пожароопасным (содержание пиритной серы более 35%) [1]. Приуроченность рудных зон месторождения к области мощного межслоевого тектонического нарушения типа сдвига, которому сопутствуют зоны интенсивного дробления и рассланцевания вмещающих пород, облегчающие доступ кислорода, увеличивает пожароопасность месторождения. На пожароопасность Орловского месторождения существенно влияют пострудные дизъюнктивные тектонические нарушения типа сбросов, которым сопутствуют зоны мелкораздробленной перетертой руды мощностью до 3—4 м [2]. Мелкораздробленная и перетертая руда окисляется значительно интенсивнее, чем монолитная, так как является более проницаемой по отношению к окисляемым образованиям и имеет большую поверхность для окисления. Аналогичное влияние на пожароопасность месторождения оказывает трещинная тектоника.

В настоящее время при проведении выработок в неустойчивых рудах и породах на Орловской шахте в качестве крепи используются металлические рамные крепи СВП-22 с накатником из круглого леса и забучиванием пустот закрепного пространства костровой крепью. При забучивании пустот костровой крепью из-за того, что забутка пустот костровой крепью не подведена вплотную к обнажению горного массива по кровле и бортам выработки, не обеспечивается надежный контакт «крепь — горный массив». При отслоении горного массива с кровли при некачественной забутке происходит нарушение рам СВП, т.е. крепь не гарантирует поддержание кровли в устойчивом состоянии на участках очень слабого горного массива.

Наличие незаполненных пустот за верхняками рам металлической крепи является причиной неудовлетворительного управления горным давлением в выработках [3]. Известно, что незаполненные пустоты в своде выработок снижают несущую способность рамной металлической крепи в 2,0—2,5 раза за счет увеличенных изгибающих моментов в криволинейной части арок, неравномерности распределения нагрузки по их периметру, возможности смещения рам к одному из боков или вдоль выработки [4]. Несущая способность крепи СВП-22 — не менее 330 кН/раму, сопротивление — не менее 260 кН/раму¹.

В ранее выполненных работах было установлено, что тщательная забутка исключает динамические нагрузки и способствует более равномерному их распределению по периметру рам [5—10]. При этом чем плотнее забутка, тем равномернее по контуру крепи распределяется внешняя нагрузка. Увеличение жесткости забутки приводит к уменьшению изгибающих моментов в элементах крепи. Кроме того, при «кострении» лесом закрепных пустот вручную люди на-

¹ ГОСТ Р 51748—2001. Крепи металлические податливые рамные. Крепь арочная. Общие технические условия.

ходятся в незакрепленной части выработки, в связи с чем данная операция является довольно травмоопасной и трудоемкой.

Повышение плотности забутовки приводит к более равномерному распределению внешней нагрузки по контуру [3], а увеличение жесткости забутовки приводит к уменьшению изгибающих моментов в элементах крепи. Для повышения работоспособности рамных крепей необходимо, чтобы податливый слой (забутовка) деформировался по мере смещения контура пород выработки от нагрузки, не превышающей прочности рамной конструкции с учетом податливости рамных металлических крепей в замковых соединениях [11]. Запас на смещения контура выработки задается параметрами податливого слоя и запасом податливости рамных металлических крепей в замковых соединениях.

В нормативных документах отмечено, что не допускается закладка пустот лесом при креплении горных выработок несгораемыми материалами¹. Смещения, компенсируемые за счет сжатия забутовочного материала, зависят от сжимаемости материала, толщины забутовочного слоя и расчетной нагрузки на крепь и определяются опытным путем².

Для исключения притока кислорода к очагу эндогенного пожара на Орловской шахте выработанное пространство в районе очага должно быть изолировано путем установки изолирующих перемычек или покрытия подходных выработок пленкообразующим компонентом, обеспечивающим уменьшение диффузии и просачивание кислорода к очагам самовозгорания сульфидных руд в виде утечек воздуха, который фильтруется через тело перемычки и трещины во вмещающих выработку породах.

Таким образом, при выборе забутовочного материала при проходке горных выработок на Орловской шахте необходимо учитывать следующие факторы:

1) материал, толщина и прочность забутовки выбираются таким образом, чтобы сформировать плотный и непосредственный контакт с вмещающими породами, а также обеспечить несущую способность возведенной рамной крепи, соответствующую существующим значениям горного давления и конвергенции вмещающих пород и не допустить существенного возрастания сосредоточенных случайных нагрузок на крепь, что резко снижает ее несущую способность, ведет к деформациям ее элементов, поломкам и даже завалам выработки;

2) материал забутовки пустот закрепного пространства должен обеспечивать уменьшение диффузии и просачивание кислорода к очагам самовозгорания сульфидных руд.

При этом забутовку необходимо возводить как можно раньше, чтобы она могла воспринять нагрузки, вызванные деформациями массива горных пород на ранних стадиях и предупредить быстрое формирование зоны разрушенных пород.

В рамках опытно-промышленных работ на Орловской шахте в качестве забутовки пустот закрепного пространства при креплении горных выработок метал-

¹ Правила обеспечения промышленной безопасности для опасных производственных объектов, ведущих горные и геологоразведочные работы. Утверждены Приказом Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 30 декабря 2014 года № 352.

² Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи // ВНИИМ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. М.: Стройиздат, 1983. 272 с.

лической рамной крепью с накатником из круглого леса были испытаны вспенивающиеся негорючие материалы (фенольные двухкомпонентные смолы «Блокфил»). Фенольная смола «Блокфил» содержит формальдегид — 0,01 мг/м³; метиловый спирт — 0,5 мг/м³; аммиак — 0,04 мг/м³; фенол — 0,003 мг/м³.

Опыт работ по забутовке пустот закрепного пространства фенольной смолой «Блокфил» при проходке выработок на Орловской шахте показал, что после производства буровзрывных работ в забое выработки при расстоянии около 1,5 м от забутовки до груди забоя разрушение забутовочного материала из смолы «Блокфил» не происходило (рис. 1).

Прочность на сжатие при 10% деформации затвердевшей смолы «Блокфил» по данным компании ТОО «ДСИ Техно» составляет 0,02 МПа.

В ходе опытно-промышленных испытаний были отмечены случаи отставания по времени забутовки пустот закрепного пространства вспенивающимися материалами, что в конечном итоге приводило к полной деформации элементов рамной крепи из-за высокого горного давления.

Так, на слоевом штреке блока 12 с на нижнем горизонте Орловской шахты была апробирована технология забутовки пустот закрепного пространства вспенивающимися материалами. Закрепные пустоты заполнялись фенольной смолой «Блокфил». Однако в дальнейшем при проходке данной выработки было выставлено шесть рам без забутовки пустот фенольной смолой. Вероятно, частично забутовка все-таки была выполнена из костровой крепи, что необходимо для поддержания накатника на рамной крепи. Однако плотного контакта обнажений вмещающих пород с забутовкой не было.



Рис. 1. Состояние забутовки пустот закрепного пространства из фенольной смолы «Блокфил» после проведения буровзрывных работ, вид со стороны забоя при отставании крепления от груди забоя 4 м

[**Fig. 1.** The state of backfilling of the voids of the unsupported roof space from the phenolic resin “Blockfil” after drilling and blasting operations, the view from the side of the face when the supports are 4 m from the face]

В последующем в результате отслоений горной массы рамы были полностью деформированы, в связи с чем для приведения выработки в безопасное состояние необходимо было перекреплять аварийный участок выработки. Руководством шахты было принято решение об остановке работ на слоевом штреке блока 12с и дальнейшем заполнении его бетонной закладкой.

При этом смежные рамы с аварийным участком, пустоты закрепного пространства которых были забутованы фенольной смолой, не были деформированы.

Теплопроводность образца фенольной смолы «Блокфил» определена в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН на измерителе теплопроводности сканирующем на эталонах полиметилметакриата методом игольчатого зонда. Однако в силу того, что нижний предел эталонов в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН представлен относительно высоким значением теплопроводности $0,194 \text{ Вт/м} \cdot \text{°K}$, полученный с помощью измерителя теплопроводности результат при использовании эталонов с более высоким значением, чем у образца, имеет более завышенные показатели. Поэтому измерения коэффициента теплопроводности были продублированы с помощью абсолютного метода (игольчатого зонда), результаты которого являются более достоверными ($\lambda = 0,026 \text{ Вт/м} \cdot \text{°K}$).

В работе [2] были определены теплофизические показатели руд и вмещающих пород Орловского месторождения (табл. 1).

Таблица

Теплофизические показатели руд и вмещающих пород Орловского месторождения
[Table. Thermophysical parameters of ores and enclosing rocks of Orlovsky mine]

Тип породы [Rock type]	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м \cdot °K [Thermal conduction coefficient λ , W/m \cdot °K]
Сплошная полиметаллическая руда [Massive polymetallic ore]	5,5–5,9
Сплошная барит-полиметаллическая руда [Massive barite-polymetallic ore]	4,88–7,44
Сплошная медно-цинковая руда [Massive copper-zinc ore]	3,4–11,3
Сплошная медно-колчеданная руда [Massive copper-sulphide ore]	4,21–4,204
Алевролит [Siltstone]	0,4–3,8
Аргиллит [Argillite]	0,2–3,0
Глинистый сланец [Argillaceous slate]	0,2–3,0
Известняк влажный [Wet limestone]	0,9–4,4
Песчаник плотный [Tight sandstone]	2,33

Сравнение полученных значений коэффициента теплопроводности руд, вмещающих пород Орловского месторождения и фенольной смолы показывают, что она вполне может выполнять роль изоляционного материала при забутовке закрепных пустот при проходке горных выработок в условиях наличия очагов самонагрева рудного массива при интенсивном окислении сульфидных руд.

Кроме того, забутовка закрепных пустот вспенивающими материалами позволит исключить или существенно снизить контакт обнаженной поверхности рудного массива с кислородом рудничного воздуха, а при контакте руды с кислородом рудничного воздуха разогрев поверхности рудного массива в течение года может достигнуть 200–260 °С [2], что близко к температуре самовозгорания пиролизированной древесины, что подтверждается замерами, выполненными пылевентиляционной службой Орловской шахты, показывающими, что температура рудничного воздуха в горных выработках в результате окисления и самонагревания руды может превысить 100 °С.

Таким образом, применение в качестве забутовки закрепного пространства фенольной смолы позволит снизить интенсивность реакции окисления и предотвратить самонагревание руды до критических температур, а также предотвратить или замедлить процесс нагревания рудничного воздуха от разогретой поверхности рудного массива до температур, превышающих нормативные значения.

К недостаткам использования в качестве забутовки закрепного пространства фенольной смолы можно отнести невозможность охлаждения поверхности прогретого рудного массива за счет контакта с рудничным воздухом. Однако охлаждение поверхности прогретой выработки (массива) в условиях контакта с сухим рудничным воздухом ($\lambda = 0,034 \text{ Вт/м} \cdot \text{°К}$) при скорости потока порядка 0,1–0,5 м/с и с температурой, близкой к температуре прогретого массива, проходит очень медленно, при этом температура поверхности может снизиться до 55–60 °С в течение 2,5–3,0 лет.

Удельные затраты на забутовку закрепного пространства вспенивающимися материалами в сравнении с забутовкой пустот «костровой» крепью довольно высоки (рис. 2).

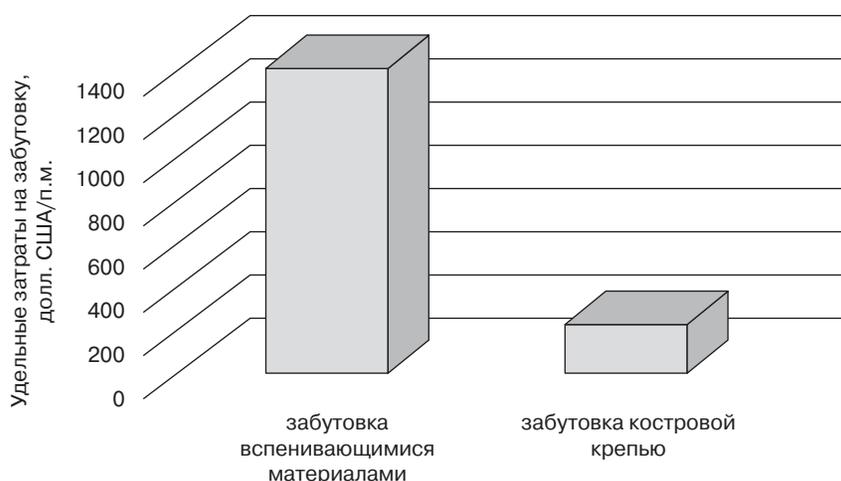


Рис. 2. Удельные затраты на забутовку закрепного пространства вспенивающимися материалами и «костровой» крепью на 1 п.м. выработки сечением $S_{пр} = 16,0 \text{ м}^2$
[Fig. 2. Specific costs for backfilling of unsupported roof space with foaming materials and chock support for 1 m. of output with section $S_{pr} = 16.0 \text{ м}^2$]

По данным [12], температура термической деструкции фенольной смолы «Блокфил» составляет около 700 °С, при этом потеря массы образца составляет всего 21,7%. Фенольная смола «Блокфил» по классу опасности материала по значению показателя токсичности продуктов горения относится к высокоопасным, по группе горючести материала — к трудногорючим.

Контакт продукции с кожей может привести к сильному раздражению, ожогам. Пары продукции в концентрациях, превышающих ПДК для воздуха рабочей зоны, раздражают верхние дыхательные пути и слизистые оболочки глаз, оказывают воздействие на центральную нервную систему (ЦНС), печень, почки. Входящие в состав вещества способны вызывать аллергические заболевания в производственных условиях (при контакте с кожей), канцерогенны. Контроль воздуха рабочей зоны необходимо осуществлять по гидроксibenзолу, серной кислоте, фосфорной кислоте, формальдегиду, 4-гидроксibenзолсульфо кислоте.

Анализ проведенных исследований и опытно-промышленных работ на Орловской шахте свидетельствует о том, что применение в качестве забутовки пустот закрепного пространства негорючими вспенивающимися материалами при креплении горных выработок металлической рамной крепью обеспечивает сохранность проводимых горных выработок и позволяет предотвратить самонагревание руды до критических температур, замедлить процесс нагревания рудничного воздуха от разогретой поверхности рудного массива до температур, превышающих нормативные значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Ходжаев Р.Р., Габайдуллин Р.И., Асаинов С.Т., Побединская И.В.* Исследование пожароопасности при добыче сульфидных руд подземным способом // Тез. докл. XXIX международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Балашиха, 2017. С. 205—208.
- [2] *Нургалиева А.Д., Рахимберлина А.А., Какенова М.Ж., Габайдуллин Р.И.* Пожароопасность Орловского месторождения // Труды международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства — основа реализации плана нации» (Сагиновские чтения № 7). Ч. 2. Карагандинский государственный технический университет. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2015. с. 187—189.
- [3] *Ерофеев Л.М., Мирошникова Л.А.* Повышение надежности крепи горных выработок. М.: Недра, 1988. 245 с.
- [4] *Мартыненко И.И., Мартыненко И.А., Минакова Ж.А.* Влияние заполнения закрепного пространства на работу крепи // ГИАБ. 2005. С. 160—163.
- [5] *Максимов А.П., Шашенко А.Н., Рожко А.Н.* Влияние качества забутовки на несущую способность металлической арочной крепи // Шахтное строительство. 1987. С. 21—23.
- [6] *Мартыненко И.И., Мартыненко И.А., Минакова Ж.А.* Влияние заполнения закрепного пространства на работу крепи // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 8. С. 160—163.
- [7] *Великий И.Г., Чертянко В.И., Черкасов В.В., Любашевская Н.В., Шаповалов Ю.С.* О выборе забутовочного материала для ЗЗП горных выработок // Шахтное строительство. 1978. № 9. С. 12—14.
- [8] *Галушко П.Я.* Влияние ширины слоя и состава забутовки на взаимодействиях пород и крепи // Уголь Украины. 1977. № 4. С. 6—8.

- [9] *Заславский И.Ю.* Несущая способность арочной крепи при ТЗП // Шахтное строительство. 1987. № 10. С. 11—13.
- [10] *Симанович Г.А.* О прочности тампонажного раствора в закрепном пространстве горных выработок // Шахтное строительство. 1987. № 12. С. 10—13.
- [11] *Солодянкин А.В., Ганеев С.Н.* Численное моделирование влияния параметров податливой забутовки на напряженно-деформированное состояние вмещающего выработку массива // Материалы IV международной научно-практической конференции «Проблемы горного дела и экологии горного производства». Антрацит. 2009. С. 115—123.
- [12] *Уварова В.А.* Методологические основы контроля пожароопасных и токсических свойств шахтных полимерных материалов: дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2016. 300 с.

© Шапошник Ю.Н., Конури́н А.И., Шокарев Д.А., Шапошник С.Н., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 20 февраля 2018

Дата принятия к печати: 28 апреля 2018

Для цитирования:

Шапошник Ю.Н., Конури́н А.И., Шокарев Д.А., Шапошник С.Н. Разработка технологии крепления горных выработок в условиях интенсивного окисления сульфидных руд на Орловском месторождении // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 2. 235—245. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-235-245

Сведения об авторах:

Шапошник Юрий Николаевич — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук. *Область научных интересов:* геомеханика, механические свойства и разрушение геоматериалов и горных массивов, проблемы геотехнологий и обогащения минерального сырья. *Контактная информация:* e-mail:shaposhnikyury@mail.ru

Конури́н Антон Игоревич — кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук. *Область научных интересов:* механические свойства и разрушение геоматериалов и горных массивов, современная геодинамика, моделирование геодинамических процессов. *Контактная информация:* e-mail:akonurin@yandex.ru

Шокарев Денис Александрович — директор ТОО «Expert PRO». *Область научных интересов:* проблемы геотехнологий и обогащения минерального сырья, современная геодинамика, моделирование геодинамических процессов. *Контактная информация:* e-mail: denshok82@mail.ru

Шапошник Сергей Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры геологии и горного дела, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева. *Область научных интересов:* сейсмология, сейсмические волны, проблемы геотехнологий и обогащения минерального сырья. *Контактная информация:* e-mail: shaposhniksergey@mail.ru

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR SUPPORTING MINE WORKINGS UNDER CONDITIONS OF INTENSE OXIDATION OF SULFIDE ORES AT THE ORLOVSKY MINE

Yu.N. Shaposhnik¹, A.I. Konurin¹, D.A. Shokarev², S.N. Shaposhnik³

¹ N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences
54, Krasny Prospekt, Novosibirsk, 630091, Russian Federation

² Expert PRO

47, Protozanov A.K. str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan

³ East Kazakhstan State Technical University (EKSTU)

69, Protozanov A.K. str., Ust-Kamenogorsk, 070004, Republic of Kazakhstan

Abstract. *Goal.* Metal frame supports SVP-22 with round timber lagging and backfilling of the voids of unsupported space with chock support is used in the workings of unstable ores and rocks at the Orlovsky mine. When filling the voids with a chock support manually, people are located in an unsupported part of the working, therefore this operation is hazardous and laborious. The purpose of the work is to select and test the backfill material for voids of unsupported space, which ensures a decrease in diffusion and oxygen seepage to the centers of spontaneous ignition of the ore bodies under conditions of intense oxidation of sulphide ores at the Orlovsky deposit. *Methods.* Foaming non-combustible materials (“Blockfil” phenolic two-component resins) were tested in the experimental works at the Orlovsky mine for backfilling the voids when supporting the mine workings by metal frame supports with a round timber lagging. *Results.* It has been established that the use of phenolic resins as backfilling will reduce the intensity of the oxidation reaction and prevent self-heating of the ore to critical temperatures, and also prevent or slow down the process of heating of mine air from the heated surface of the ore body to temperatures exceeding the design values. *Conclusions.* The use of phenolic resin “Blockfil” to fill the voids ensured the absence of deformation of the elements of the metal frame support and the safety of mining, and also allowed to reduce the intensity of the oxidation reaction and prevent self-heating from the ore to critical temperatures and prevent or slow down the process of heating the mine air from the heated surface of the ore body to temperatures, exceeding the design values.

Key words: underground mining, unsupported space, frame support, dynamic loads, support flexibility, backfilling, phenolic resin, foamed clay pulp

REFERENCES

- [1] Khodzhaev R.R., Gabaidullin R.I., Asainov S.T., Pobedinskaya I.V. Issledovanie pozharoopasnosti pri dobyche sul’fidnykh rud podzemnym sposobom [The study of fire danger in the extraction of sulphide ores by an underground method]. Tez. dokl. XXIX mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 80-letiyu FGBU VNIPO MChS Rossii [Abstracts of XXIX International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 80th anniversary of the FGB VNIPO EMERCOM of Russia]. Balashikha, 2017. 205–208. (In Russ.)
- [2] Nurgalieva A.D., Rakhimberlina A.A., Kakenova M.Zh., Gabaidullin R.I. Pozharoopasnost’ Orlovskogo mestorozhdeniya [On the fire hazard of the Orlovsky deposit]. Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Integratsiya nauki, obrazovaniyai proizvodstva — osnova realizatsii plana natsii» (Saginovskiechteniya № 7). Ch. 2 [Proceedings of international scientific and practical conference “Integration of science, education and production — the basis for the implementation of the national plan” (Saginov Readings No. 7). Part 2]. Karaganda State Technical University. Karaganda: KARGTU Publ., 2015. 187–189. (In Russ.)
- [3] Erofeev L.M., Miroshnikova L.A. Povysheniye na dezhnosti podderzhki gornyykh vyrabotok [Increasing the reliability of mine workings supports]. Moscow: Nedra Publ., 1988. 245 p. (In Russ.)

- [4] Martynenko I.I., Martynenko I.A., Minakova Zh.A. Vliyaniye zapolneniya fiksirovannogo prostranstva na krepirovaniye [Influence of unsupported spacefilling on support strength]. GIAB, 2005. P. 160—163. (In Russ.)
- [5] Maksimov A.P., Shashenko A.N., Rozhko A.N. Vliyaniye kachestva zasyпки na nesushchuy usposobnost' opory metallicheskoy dugi [Influence of the quality of backfill on the bearing capacity of metal arc support]. *Shakhtnoe stroitel'stvo [Mine Construction]*. 1987. P. 21—23. (In Russ.)
- [6] Martynenko I.I., Martynenko I.A., Minakova Zh.A. Vliyaniye zapolneniy azakrepnogo prostranstva rabotu krepі [Influence of unsupported space filling on support strength]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2005. No. 8. 160—163. (In Russ.)
- [7] Veliky I.G., Cheretyanko V.I., Cherkasov V.V., Lyubashevskaya N.V., Shapovalov Yu.S. O vybore zabutovochnogo materiala dlya ZZP gornykh vyrabotok [On selecting backfill material for filling voids of unsupported space in mine workings]. *Shakhtnoe stroitel'stvo [Mine Construction]*. 1978. No. 9. P. 12—14. (In Russ.)
- [8] Galushko P.Ya. Vliyaniye shiriny sloyi sostava zasyпки na vzaimodeystviye porodi krepі [Influence of layer width and composition of backfill on the interaction of rocks and supports]. *Ugol' Ukrainy [Coal of Ukraine]*. 1977. No. 4. P. 6—8. (In Russ.)
- [9] Zaslavsky I.Ya. Nesushchaya sposobnost' arochnoy krepі pri TZP [Strength of arch support with thermal protection coating]. *Shakhtnoe stroitel'stvo [Mine Construction]*. 1987. No. 10. P. 11—13. (In Russ.)
- [10] Simanovich G.A. O prochnosti tamponazhnogo rastvora v zakreпnom prostranstve gornykh vyrabotok [On the strength of cement mortar in unsupported space of mine workings]. *Shakhtnoe stroitel'stvo [Mine Construction]*. 1987. No. 12. P. 10—13. (In Russ.)
- [11] Solodyankin A.V., Gapeev S.N. Chislennoe modelirovaniye vliyaniya parametrov podatlivoy zabutovki na napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye vmeshchayushchego vyrabotku massiva [Numerical modeling of effect of flexible backfill parameters on stress-strain state of ore containing rock body]. *Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy gornogo dela i ekologiyi gornogo proizvodstva» [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference “Problems of Mining and Ecology of Mining Industry”]*. Antratsit. 2009. P. 115—123. (In Russ.)
- [12] Uvarova V.A. Metodologicheskiye osnovy kontrolya pozharoопасnykh i toksicheskikh svoystv shahtnykh polimernykh materialov. Dokt. Diss. [Methodological fundamentals of control of fire-hazardous and toxic properties of mine polymeric materials. Doct. Diss.]. Moscow, 2016. 300 p. (In Russ.)

Article history:

Received: February 20, 2018

Accepted: April 28, 2018

For citation:

Shaposhnik Yu.N., Konurin A.I., Shokarev D.A., Shaposhnik S.N. (2018). Development of technology for supporting mine workings under conditions of intense oxidation of sulfide ores at the Orlovsky mine. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 235—245. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-234-245

Bio Note:

Yuriy N. Shaposhnik — Doctor of Technical Sciences, leading research associate, laboratory of engineering physics geotechnologies, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. *Research interests*: geomechanics, mechanical properties and destruction of geomaterials and mountain massifs, problems of geotechnology and mineral processing. *Contact information*: e-mail: shaposhnikyury@mail.ru

Anton I. Konurin — Candidate of Technical Sciences, research associate, laboratory of engineering physics geotechnologies, N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy

of Sciences. *Research interests*: mechanical properties and failure of geomaterials and rock bodies, modern geodynamics, modeling of geodynamic processes. *Contact information*: e-mail: akonurin@yandex.ru

Denis A. Shokarev — CEO “Expert PRO”. *Research interests*: problems of geotechnology and mineral processing, modern geodynamics, modeling of geodynamic processes. *Contact information*: e-mail: denshok82@mail.ru

Sergey N. Shaposhnik — Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Geology and Mining, East Kazakhstan State Technical University (EKSTU). *Research interests*: seismology, seismic waves, problems of geotechnology and mineral processing. *Contact information*: e-mail: shaposhniksergey@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-246-253

УДК 669.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО И ХИМИКО-МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВОВ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМТОР

М.Ю. Малькова, А.Н. Задиранов

Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

Проведены исследования гранулометрического, минерального и химического состава руды комплексного скандий-редкоземельно-ниобиевого месторождения Томтор. Показано, что основу руды составляют фосфаты, ниобаты и карбонаты. Основными идентифицированными минералами являются минералы крандаллитовой группы (горсейскит, гоэцит и флоренсит), пирохлор и монацит, кроме того, четко идентифицированы бемит, апатит и кварц. В группу прочих минералов входят сидерит, каолинит, рутил и некоторые другие минералы. Установлено, что исследуемая руда относится к минеральной разновидности пирохлор-монацит-крандаллитовых руд фосфатно-редкометалльного типа с преобладанием в ее составе минералов группы крандаллита (более 50%) и относительно невысоким содержанием пирохлора (~7%). По содержанию в пробе оксида ниобия Nb_2O_5 (~4%) руда по принятой классификации может быть отнесена ко второму сорту, т.е. к богатым ниобиевым рудам, содержащим от 3,5 до 9% Nb_2O_5 . Руда месторождения Томтор также богата по содержанию минералов редкоземельных элементов. На основании проведенных исследований сделан вывод о практической невозможности обогащения руды месторождения Томтор традиционными методами и экономической оправданности переработки руды комбинированными методами пиро- и гидрометаллургии.

Ключевые слова: руда месторождения Томтор, гранулометрический состав, минеральный состав, редкоземельные металлы (РЗМ), ниобий

Введение

Известно [1–3], что масштабы производства и потребления редкоземельных металлов (РЗМ) в мире за последние 20 лет увеличились в 3 раза. Анализ темпов современного развития промышленного производства показывает, что в ближайшие 5–10 лет потребность в редкоземельных металлах существенно вырастет. В связи с этим важнейшим направлением научных исследований представляется изучение действующих и новых перспективных месторождений руд РЗМ с целью решения задачи организации их высокоэффективной промышленной переработки и наиболее полного извлечения ценных металлов.

Одним из наиболее перспективных месторождений руд РЗМ на территории Российской Федерации является Томторское комплексное скандий-редкоземельно-ниобиевое месторождение, расположенное на северо-западе Республики Саха

(Якутия), в экономически не освоенном районе. Практическая значимость руд Томтора определяется колоссальными запасами и уникальными концентрациями ниобия, иттрия, скандия и тербия. Запасы месторождения оцениваются в 154 млн т руды. По запасам и концентрациям РЗМ оно превышает все известные мировые аналоги и является уникальным: средняя массовая доля оксидов РЗМ достигает 8–12%, в том числе 0,5% наиболее ценного оксида иттрия (III) [4]. Также руды Томтора содержат большие концентрации ниобия (до 7%). Руды первоочередного к эксплуатации участка Буранный Томторского месторождения представлены высокими содержаниями ниобия, иттрия, скандия и относятся к классу комплексного полиметаллического сырья. Объем кондиционных руд участка Буранный, подсчитанный по бортовому содержанию Nb_2O_5 — 1%, составляет 42,7 млн т [5]. Содержание оксидов редкоземельных металлов в рудах месторождения Томтор в 2 раза выше, чем в наиболее богатом зарубежном месторождении Маунтен-Пасс в США, а содержание ниобия в 2,5–3 раза выше, чем в самом богатом месторождении Бразилии — Агаха, обеспечивающем более 80% мировой добычи ниобия [6; 7]. Проблемой освоения Томторского месторождения является то, что оно располагается в районе с суровыми климатическими условиями и неразвитой инфраструктурой.

Распределение РЗМ в рудах Томторского месторождения представлено на рис. 1 [8].

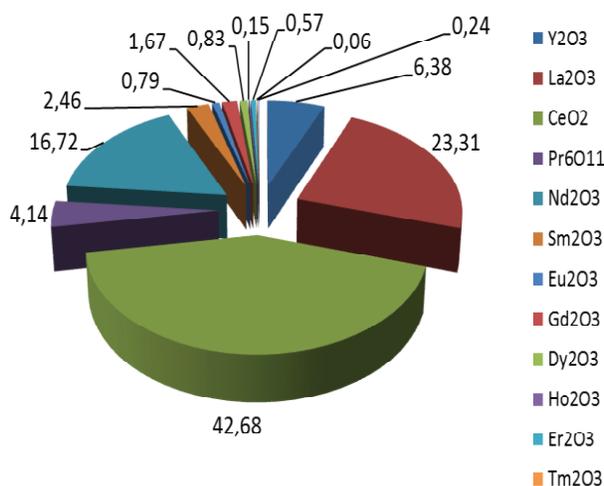


Рис. 1. Относительная массовая доля РЗМ в рудах Томторского месторождения
[Fig. 1. Relative mass fraction of REE in ores of Tomtor Deposit]

Целью данной работы являлось изучение технологической пробы руды месторождения Томтор для определения методов ее промышленной переработки. Для достижения поставленной цели исследования были выполнены следующие задачи:

- исследование гранулометрического, минерального и химического состава руды;
- изучение распределения целевых компонентов руды по классам крупности.

Методика проводимых исследований

Гранулометрический состав материала пробы определяли с помощью набора сит ЭКРОС (ТУ 3618-001-39436682—98).

Минеральный состав пробы исследуемой руды определяли методом электронной микроскопии (энергодисперсионный анализ).

Изучение вещественного состава пробы проводилось с использованием количественного химического анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП).

Результаты исследований

Технологическая проба руды месторождения Томтор представляет собой тонкодисперсный сыпучий материал темно-оливкового цвета крупностью $-2+0$ мм. Влажность руды составляет порядка 15%. Гранулометрический состав и содержание целевых компонентов по классам крупности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав и содержание целевых компонентов в руде месторождения Томтор по классам крупности
[Table 1. Particle size distribution and content of target components in Tomtor ore deposit by fraction sizes]

Размер фракции, мм [Fraction size, mm]	Доля фракции, % [Fraction percentage, %]	Плотность [Density]		Содержание, масс. % [Content, wt. %]			
		удельная, г/см ³ [Specific, g/cm ³]	объемная, г/см ³ [Bulk, g/cm ³]	Сумма РЗО*** [REO amount***]	Nb ₂ O ₅	P ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃
$-1+0^*$	100	3,42	1,55	19,8	4,00	22,5	0,062
$-1,0+0,5$	5,8	3,43	1,57	19,5	3,15	21,8	0,052
$-0,5+0,315$	14,8	3,54	1,58	20,4	3,37	19,0	0,060
$-0,315+0,1$	47,4	3,56	1,58	20,1	3,57	18,2	0,064
$-0,1+0,045$	6,8	3,55	1,62	21,6	4,00	20,8	0,078
$-0,045+0$	25,2	3,56	1,65	22,8	4,44	22,6	0,090
$-0,020+0^{**}$	20,2	—	—	22,5	4,65	22,1	0,092

* исходная проба руды (до отсева); ** выход фракции $-0,020+0$ мм определялся методом седиментационного анализа; *** РЗО — оксиды редкоземельных металлов [* the original ore sample (before sieving); ** output fraction $-0,020+0$ mm was determined by sedimentation analysis; *** REO — oxides of rare earth metals]

Как следует из представленных данных, гранулометрический состав руды в пробе характеризуется довольно высоким содержанием частиц тонких классов, при этом массовая доля частиц с размером менее 100 мкм составляет около 80%, менее 45 мкм — около 25% и менее 20 мкм — около 20%. Соотношения классов различной крупности, а также значения плотности являются типичными для предварительно дробленных по классу $-1+0$ мм пироклор-монацит-крандаллитовых руд.

Минеральный и химический составы исследуемой пробы представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Минеральный состав руды месторождения Томтор
[Table 2. Mineral composition of Tomtor ore deposits]

Наименование минерала [Name of mineral]	Содержание, % [Content, %]
Крандаллит [Crandallite] $\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$	—
Горсейксит [Gorceixite] $\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$	25
Гояцит [Goyazite] $\text{SrAl}_3(\text{OH})_4(\text{HPO}_4)_2(\text{PO}_4)$	20
Флоренсит [Florencite] $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	8
Пирохлор [Pyrochlore] $(\text{Na}, \text{Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH}, \text{F})$	7
Бемит [Boehmite] AlOOH	4
Апатит [Apatite] $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$	3
Монацит [Monazite] $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Ca})(\text{PO}_4)$	13
Кварц [Quartz] SiO_2	1
Прочие (сидерит, каолинит, рутил) [Other (siderite, kaolinite, rutile)]	19
Минералы крандаллитовой группы: горсейксит, гояцит, флоренсит [Minerals of crandallite groups: gorceixite, goyazite, florencite]	53

Таблица 3

Химический состав руды месторождения Томтор
[Table 3. Chemical composition of Tomtor ore deposits]

№ п/п	Элемент (оксид) [Element (oxide)]	Содержание [Content], %	№ п/п	Элемент (оксид) [Element (oxide)]	Содержание [Content], %
1	Ag	<0,01	33	Nb_2O_5	4,0
2	Al_2O_3	14,4	34	Nd_2O_3	2,5
3	As	0,37	35	Ni	0,007
4	Au	<0,003	36	P_2O_5	22,5
5	B	0,19	37	Pb	0,25
6	BaO	2,9	38	Pd	<0,005
7	Be	<0,001	39	Pr_6O_{11}	0,62
8	CaO	8,5	40	Pt	<0,005
9	Cd	0,004	41	Re	<0,005
10	CeO_2	9,3	42	Rh	<0,003
11	Co	<0,001	43	Ru	<0,0001
12	Cr	0,06	44	S	2,3
13	CuO	0,14	45	Sb	<0,02
14	Dy_2O_3	0,19	46	Sc (Sc_2O_3)	0,04 (0,061)
15	Er_2O_3	0,17	47	SrO	3,7
16	EuO	0,12	48	SiO_2	1,9
17	Fe	3,6	49	Sm_2O_3	0,39
18	Ga	<0,05	50	Sn	<0,01
19	Gd_2O_3	0,32	51	Ta_2O_5	0,08
20	Hf	<0,002	52	Tb_4O_7	0,03
21	Hg	<0,007	53	Te	<0,01
22	Ho_2O_3	0,04	54	ThO_2	0,14

№ п/п	Элемент (оксид) [Element (oxide)]	Содержание [Content], %	№ п/п	Элемент (оксид) [Element (oxide)]	Содержание [Content], %
23	J	<0,03	55	TiO ₂	6,7
24	Jn	<0,02	56	Tm ₂ O ₃	0,01
25	Jr	<0,01	57	U	0,005
26	La ₂ O ₃	4,8	58	V ₂ O ₅	2,1
27	Li	0,0005	59	W	<0,02
28	Lu ₂ O ₃	0,003	60	Y ₂ O ₃	1,16
29	MgO	0,62	61	Yb ₂ O ₃	0,096
30	MnO ₂	0,9	62	ZnO	0,42
31	Mo	<0,007	63	ZrO ₂	0,11
32	Na	0,58	64	P ₂ O ₅	19,75

Представленные в табл. 2 и 3 результаты позволяют сделать следующие заключения о вещественном составе руды месторождения Томтор.

Основу руды в пробе составляют фосфаты, ниобаты и карбонаты. Основными идентифицированными минералами являются минералы крандаллитовой группы (горсейскит, гоэит и флоренсит), пирохлор и монацит, кроме того, четко идентифицированы бемит, апатит и кварц. В группу прочих минералов входят сидерит, каолинит, рутил и некоторые другие минералы.

В целом, исследуемая руда относится к минеральной разновидности пирохлор-монацит-крандаллитовых руд фосфатно-редкометалльного типа с преобладанием в ее составе минералов группы крандаллита (более 50%) и относительно невысоким содержанием пирохлора (~7%). По содержанию в пробе Nb₂O₅ (~4%) руда по принятой классификации может быть отнесена ко второму сорту, т.е. к богатым ниобиевым рудам, содержащим от 3,5 до 9% Nb₂O₅.

Выводы

Руда месторождения Томтор является тонкодисперсным материалом, частицы которого представлены полиминеральными агрегатами (флоккулами) из микрокристаллов размером в доли микрометра, сформированными в основном полиморфными модификациями фосфатов с общей формулой (Sr,Ba,Ca)Al₃(PO₄)_x(OH)_y, в кристаллической решетке которых атомы Sr, Ba и Ca частично замещаются атомами редкоземельных элементов.

По содержанию промышленно-ценных и породообразующих элементов руда не является аномальной. Руда принадлежит к пирохлор-монацит-крандаллитовой разновидности фосфатно-редкометалльного типа с относительно невысоким содержанием ниобиевых минералов и богата по содержанию минералов редкоземельных элементов. В исходной и измельченной пробах руды практически отсутствуют обособленные (раскрытые) частицы отдельных минералов ценных элементов. Проба руды характеризуется однородностью физико-механических свойств рудного материала при высокой гетерогенности минерального состава.

Учитывая высокую комплексность исследуемой руды и тонкую дисперсность минеральных образований, можно сделать вывод о практической невозможности обогащения руды месторождения Томтор традиционными методами. Однако значительное содержание оксидов редкоземельных элементов (~20%) и относительно высокое содержание ниобия (~4% Nb₂O₅) позволяет считать перспективной и экономически оправданной переработку руды комбинированными методами пиро- и гидрометаллургии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Петухов М.А.* Исследование процесса хлорирования танталито-колумбитового концентрата и создание технологии совместной переработки танталито-колумбитового и лопаритового концентратов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2010. 26 с.
- [2] *Наумов А.В.* Обзор мирового рынка редкоземельных элементов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2008. № 1. С. 22—31.
- [3] *Чуб А.В.* Гибкие многоцелевые технологии глубокой переработки редкоземельного сырья хлорным методом: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Соликамск, 1999. 16 с.
- [4] *Полякова М.А.* Элементный состав редкоземельных руд и его влияние на оценку месторождений: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: ИМГРЭ, 2002. 32 с.
- [5] *Архангельская В.В., Лагонский Н.Н., Усова Т.Ю., Чистов Л.Б.* Руды редкоземельных металлов России // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. 2006. № 19.
- [6] *Еханин А.Г., Шибистов Б.В., Курбатов И.И.* Ресурсная минерально-сырьевая база цветных и редких металлов Красноярского края // Природные ресурсы Красноярского края. 2010. № 8. С. 82—89.
- [7] *Малькова М.Ю., Задиранов А.Н.* Перспективы создания отечественной редкоземельной промышленности // Сб. докладов VIII Международной научно-практической конференции РУДН «Инженерные системы — 2015». 2015. С. 500—505.
- [8] *Литвинова Т.Е.* Получение соединений индивидуальных РЗМ и попутной продукции при переработке низкокачественного редкометалльного сырья: дисс. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2014. 318 с.

© Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., 2017

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 18 декабря 2017

Дата принятия к печати: 10 апреля 2018

Для цитирования:

Малькова М.Ю., Задиранов А.Н. Исследование гранулометрического и химико-минерального составов руды месторождения Томтор // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 2. С. 246—253. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-246-253

Сведения об авторах:

Малькова Марианна Юрьевна — доктор технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* металлургия черных и цветных металлов, нанотехнологии в металлургии, материаловедение, переработка техногенных отходов. *Контактная информация:* e-mail: marianna300@yandex.ru

Задиранов Александр Никитич — доктор технических наук, профессор департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* металлургия черных и цветных металлов, нанотехнологии в металлургии, материаловедение, переработка техногенных отходов, литейное производство. Контактная информация: e-mail: zadiranov@mail.ru

STUDY OF GRANULOMETRIC AND CHEMICAL-MINERAL COMPOSITIONS OF TOMTOR ORE DEPOSIT

M.Y. Malkova, A.N. Zadiranov

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

Abstract. A study of the particle size distribution, mineral and chemical composition of the complex scandium-rare-earth-niobium Tomtor ore deposit has been conducted. It is shown that the basis of the ore is comprised of phosphates, carbonates and niobates. The main identified minerals are the minerals of crandallite group (gorceixite, goyazite and florencite), pyrochlore and monazite, in addition, clearly identified boehmite, apatite, and quartz. A group of other minerals includes siderite, kaolinite, rutile and some other minerals. It is established that the investigated ore belongs to a mineral variety of the pyrochlore-monazite-crandallite ores of phosphate-rare-metal type with a predominance of crandallite minerals (50%) and relatively low content of pyrochlore (~7%) in its composition. Based on the content of niobium oxide Nb₂O₅ (~4%) in a sample, the ore can be attributed to the second class according to the accepted classification, i.e. the rich niobium ores, containing from 3,5 to 9% Nb₂O₅. Tomtor ore deposit is also rich in the mineral content of rare earth elements. On the basis of the conducted research the conclusion about practical impossibility of beneficiation of “Tomtor” ore deposits by traditional methods and economic feasibility of ore processing by the combined pyro — and hydrometallurgy methods is made.

Key words: Tomtor ore deposit, particle size distribution, mineral composition, rare earth metals (REM), niobium

REFERENCES

- [1] Petukhov M.A. Issledovanie processa hlorigovaniya tantalito-kolumbitovogo koncentrata i sozdanie tehnologii sovmestnoj pererabotki tantalito-kolumbitovogo i loparitovogo koncentratov [A study of the chlorination process of tantalite-columbite concentrate and creation of technology of joint processing of tantalite-columbite and loparite concentrates]: Thesis abstract. ... Cand. Tech. Sc. Moscow, 2010. 26 p. (In Russ.)
- [2] Naumov A.V. Obzor mirovogo rynka redkozemel'nykh elementov [Global rare-earth elements market overview]. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya [Universities' Proceedings. Nonferrous Metallurgy]*. 2008. No. 1. P. 22—31. (in Russ.)
- [3] Chub A.V. Gibkie mnogotsel'nyye tekhnologii glubokoi pererabotki redkoelementnogo syr'ya khlornym metodom [Flexible, multi-purpose technologies of deep processing of rare element raw materials by chlorine method]: thesis abstract. ... Cand. Tech. Sc. Solikamsk, 1999. 16 p. (In Russ.)
- [4] Polyakova M.A. Elementnyi sostav redkozemel'nykh rud i ego vliyaniye na otsenku mestorozhdenii [Elemental composition of rare-earth ores and its influence on deposits allocation]: Thesis abstract. ... Cand. Geol. Min. Sc. Moscow: IMGRE Publ., 2002. 32 p. (In Russ.)

- [5] Arkhangel'skaya V.V., Lagonskii N.N., Usova T.Yu., Chistov L.B. Rudy redkozemel'nykh metallov Rossii [Ores of rare earth metals in Russia]. Mineral'noe syr'e. Seriya geologo-ekonomicheskaya [Mineral raw materials. Geological-economical series]. Moscow: VIMS Publ., 2006. No. 19. 72 p. (In Russ.)
- [6] Ekhanin A.G., Shibistov B.V., Kurbatov I.I. Resursnaya mineral'no-syr'evaya baza tsvetnykh i redkikh metallov Krasnoyarskogo kraya [Mineral resource basis of nonferrous and rare metals of Krasnoyarsk Krai]. *Prirodnye resursy Krasnoyarskogo kraya [Natural resources of Krasnoyarsk Krai]*. 2010. No. 8. P. 82–89. (in Russ.)
- [7] Mal'kova M.Yu., Zadiranov A.N. Perspektivy sozdaniya otechestvennoi redkozemel'noi promyshlennosti [Prospects for creation of domestic rare-earth industry]. Collection of reports of the VIII International Scientific and Practical Conference of RUDN "Engineering systems – 2015". Moscow: RUDN Publ., 2015. P. 500–505. (In Russ.)
- [8] Litvinova T.E. Poluchenie soedinenii individual'nykh RZM i poputnoi produktsii pri pererabotke nizkokachestvennogo redkometall'nogo syr'ya [Obtaining compounds of individual REM and associated products when processing low quality rare metal raw material]. Diss. ... Doct. Tech. Sc. Saint-Petersburg, 2014. 318 p. (in Russ.)

Article history:

Received: December 18, 2017

Accepted: April 10, 2018

For citation:

Malkova M.Yu., Zadiranov A.N. (2018). Study of granulometric and chemical-mineral compositions of Tomtor ore deposit. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 246–253. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-246-253

Bio Note:

Marianna Yu. Malkova — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Construction, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* metallurgy of ferrous and non-ferrous metals, nanotechnology in metallurgy, materials science, recycling of industrial waste. *Contact information:* e-mail: marianna300@yandex.ru

Alexandr N. Zadiranov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Construction, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* metallurgy of ferrous and non-ferrous metals, nanotechnology in metallurgy, materials science, recycling of industrial waste, foundry. *Contact information:* e-mail: zadiranov@mail.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-254-261

УДК 622.2

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НА МЕСТОРОЖДЕНИИ МКУЖУ РИВЕР В ТАНЗАНИИ

Е.В. Киселевский, Дж.К. Кумбикила, В.М. Усова

Российский университет дружбы народов (РУДН)

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

Целью исследования явилось рассмотрение различных аспектов физико-химической технологии кучного выщелачивания на месторождении Мкужу Ривер в Танзании. Важно было определить основные геотехнологические условия уранового месторождения Мкужу Ривер, провести лабораторную работу по исследованию различных технологических параметров и характеристик породы, а также анализ геотехнологического районирования. Поставленные задачи исследования решены с использованием общепринятых методических подходов решения задач на рудах с нарушенной и ненарушенной структурой материалов, которые отбирались из скважин, пробуренных на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях в урановом проекте Мкужу Ривер в Танзании. На основе проведенных исследований были определены основные геотехнологические и геолого-гидрогеологические условия, природные факторы и их влияние. Также лабораторные исследования помогли определить технологические параметры и их оптимальные значения. Установлено, что на подземное выщелачивание оказывает влияние большое число факторов, а изучение геотехнологических условий месторождений является основой для количественной и качественной оценки взаимосвязей природных и промышленных компонентов природно-промышленной системы. При этом после выделения факторов требуется адаптация способа подземного выщелачивания (ПВ) к конкретным геологическим и гидрогеологическим условиям.

Ключевые слова: уран, серная кислота, карбонатные растворы, сульфат кальция, карбонатный метод, растворитель, минеральный состав руд, распространенные окиси урана

Введение

Особенности формирования месторождения Мкужу Ривер (низкое содержание металлов, пространственное распределение минерализации, фильтрационная и геохимическая неоднородность) и специфика метода подземного выщелачивания (ПВ) (фильтрационный режим, селективность действия выщелачивающих растворов и др.) предъявляют повышенные требования к исходной и оперативной геолого-гидрогеологической и геотехнологической информации на всех стадиях освоения месторождения. Широкий диапазон изменения характеристик природных факторов предопределяет необходимость их типизации для комплексной оценки пригодности месторождений к разработке способом ПВ.

Под геотехнологическими условиями уранового месторождения Мкужу Ривер понимается комплекс природных факторов, существенным образом влияющих

на возможность применения, кинетику и результаты ПВ урана. Изучение таких условий имеет некоторые особенности, а выбор технологий ПВ базируется на выделении благоприятных и неблагоприятных факторов с районированием месторождений по характерным признакам. Указанные особенности связаны с исследованиями литологических типов пород, гео- и гидрогеохимической обстановки рудовмещающих (продуктивных) горизонтов; природных факторов, влияющих на процесс ПВ (проницаемость, карбонатность, сульфидность рудовмещающих горизонтов и т.п.); природно-технологических зон, отличающихся по условиям применения ПВ.

Методы исследования

Поставленные задачи исследования решены с использованием общепринятых методических подходов решения задач на рудах с нарушенной и ненарушенной структурой материалов, которые отбирались из скважин, пробуренных на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях в урановом проекте Мкужу Ривер в Танзании.

Геотехнологические исследования по оценке возможности выщелачивания полезных компонентов из руд месторождения Мкужу Ривер выполнялись в лабораторных и производственных условиях.

Лабораторные исследования велись по общепринятым методикам [1–4; 8]. Особенности формирования месторождения Мкужу Ривер и специфика метода ПВ предъявляют повышенные требования к исходной и оперативной геолого-гидрогеологической и геотехнологической информации на всех стадиях освоения месторождения.

По степени влияния на процесс подземного выщелачивания факторы подразделяются на решающие, главные и второстепенные, а по условиям применения ПВ — на весьма благоприятные, благоприятные и неблагоприятные (таблица). Таблица составлена на основании результатов, полученных в результате предварительного гидрогеологического исследования.

Таблица

Геолого-гидрогеологические условия месторождения Мкужу Ривер
[Table. Geological and hydrogeological conditions of the Mkuju River deposit]

Факторы, затрагивающие процесс ПВ [Factors affecting ISL]	Благоприятные параметры [Favorable parameters]	Полученные параметры [Obtained parameters]	Фактор [Factor]
Гидравлическая проводимость [Hydraulic conductivity (permeability factor)]	1—5 м/5 суток [m/5 days]	1,8—5,1 м/5 суток [m/5 days]	+
Проницаемость руд [Permeability of ores]	10—100 м ² /суток [m ² /day]	18,7—34,3 м ² /суток [m ² /day]	+
Глубина залегания рудных тел [Depth of mineralization]	<200 м [m]	26—56 м [m]	++
Содержание карбоната (CO ₂) [Carbonate content (CO ₂)]	1—2%	0,7%	++
Минеральный состав руд [Mineral composition of ore]	Распространенные окиси урана [Disseminated uranium oxides]	Вторичная минерализация урана [Secondary uranium mineralization]	+

Окончание таблицы

Факторы, затрагивающие процесс ПВ [Factors affecting ISL]	Благоприятные параметры [Favorable parameters]	Полученные параметры [Obtained parameters]	Фактор [Factor]
Продуктивность пласта [Ore productivity]	1—5 кг/м ² [kg/m ²]	1,2—18 кг/м ² [kg/m ²]	+
Положение рудного тела в водоносном горизонте в нижней части, в верхней части [Water confining beds in the aquifer top, bottom]	Выдержанный водоносный горизонт [Aged aquifer]	Наличие глинистого слоя 0,4 м до 3,5 м толщиной [The presence of clay layer 0.4 m to 3.5 m thick]	+ -
Глубина залегания уровня подземных [Depth of underground water]	10—100 м [m]	21,8—24 м [m]	+
Водообильность (удельный дебит) руд [Waterabundance (specificyield)]	0,1—0,5 л/с [l/s]	0,1 л/с [l/s]	+ -
Толщина продуктивного водоносного слоя [Thicknessofproductiveaquifer]	10—30 м [m]	Более 30 м и до 1,5 м толщина водоносного слоя [Over 30 m and local up to 1.5 m thick confining beds]	- +
Положение рудного тела в водоносном горизонте [Mineralizationlocationinaquifer]	В средней и нижней части [In the middle and lower parts]	В средней и верхней части [In the middle and upper parts]	+ -
Температура подземных вод [Aquifertemperature]	10—30°	26°	+

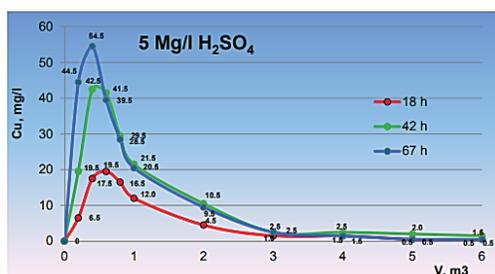
К основным факторам, определяющим возможность разработки месторождений способом подземного выщелачивания, относятся продуктивность руд и проницаемость пород продуктивных горизонтов. Месторождения инфильтрационного типа рекомендуются к отработке этим способом только в том случае, если продуктивный горизонт представлен водопроницаемыми породами и обводнен, а полезные компоненты в руде представлены минеральными формами, легко вскрываемыми слабыми водными растворами кислот или солей щелочных металлов.

В реальных условиях отдельные участки месторождений характеризуются различным соотношением параметров природных факторов, что может потребовать применения при разработке различных технологических схем и режимов ПВ, конструкций скважин и предопределяет необходимость проведения районирования месторождений по технологическим признакам. Целью такого районирования является выделение на месторождении участков (залежей или блоков), характеризующихся близкими условиями эксплуатации. Оно носит комплексный характер и определяется рядом ведущих природных факторов, влияющих на процесс ПВ. При этом один или несколько показателей выступают в качестве таксономических, а остальные — в качестве дополнительных показателей для характеристики выделенного участка месторождения. В результате по каждому такому участку оцениваются геотехнологические условия добычи полезных компонентов и прогнозируются значения основных геотехнологических параметров (концентрация реагента и металлов в продуктивных растворах, время отработки блока,

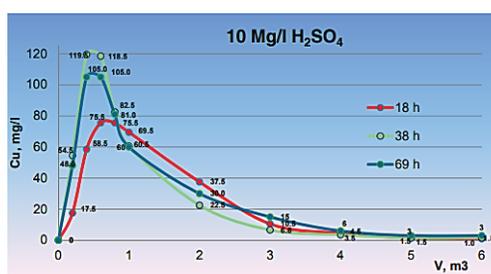
расход реагентов, степень извлечения металлов из недр, состав остаточных растворов ПВ) [7].

На рисунке с учетом открытой пористости представлено следующее:

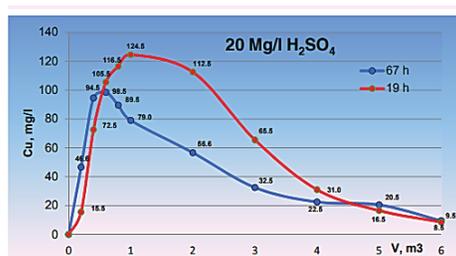
- скорость фильтрации, которая изменяется в пределах от 0,37 м/сут до 1,69 м/сут;
- концентрация серной кислоты в выщелачивающем растворе;
- выщелачивание концентратов;
- извлечение урана в растворе за короткий промежуток времени;
- урановый концентрат достигает 125 мг/л.



а



б



в

Рисунок. Результаты выщелачивания крана серной кислотой при разной концентрации серной кислоты: а — 5 мг/л; б — 10 мг/л; в — 20 мг/л
[Figure. Results of uranium leaching by sulfuric acid at different concentrations of sulfuric acid: а — 5 mg/l; б — 10 mg/l; в — 20 mg/l]

Следует отметить, что при расходе растворов 10 мг/л получаются более точные результаты.

Обсуждение

Таким образом, геотехнологическое районирование позволяет оценить особенности разработки отдельных рудных залежей или их частей, что повышает достоверность исходных данных для технико-экономической оценки месторождений, способствует разработке мероприятий по охране окружающей среды и выработке рекомендаций по дифференцированному расположению скважинных систем, применяемым реагентам, режимам процессов выщелачивания и др.

При геотехнологическом районировании месторождений в качестве объединяющего параметра, характеризующего эффективность процесса подземного

выщелачивания, является коэффициент извлечения урана, который можно рассчитать, используя следующую формулу [5]:

$$C_{\text{пр}} = \frac{10k_{\text{и}}C_{\text{р}}K_{\text{м}}M}{fK_{\text{м}}M}, \quad (1)$$

где $C_{\text{пр}}$ — содержание урана в продуктивных растворах (продуктивность раствора — коэффициент извлечения урана из пласта; $C_{\text{р}}$ — содержание урана в руде; f — отношение, характеризующее потребность в растворах для выщелачивания урана с коэффициентом извлечения $k_{\text{и}}$; $K_{\text{м}}$ и $K_{\text{м}}$ — коэффициенты фильтрации соответственно пласта руды и продуктивного горизонта в целом; M и m — мощность продуктивного горизонта и пласта руды.

В формуле (1) все параметры возможно определить лабораторно. Однако при лабораторных исследованиях коэффициенты фильтрации определяются приблизительно. Также затруднена дифференцированная оценка коэффициента извлечения, поскольку для разных способов ПВ (кислотного, кислотно-бикарбонатного, карбонатного и т.п.) эти технологические параметры будут иметь различные значения. Поэтому для технологического районирования месторождений предложено использовать условную продуктивность растворов:

$$C_{\text{у}} = C_{\text{р}}. \quad (2)$$

В выражение (2) входят только геологические параметры, не зависящие от применяемых реагентов. Районирование месторождений с использованием условной продуктивности растворов целесообразно применять в тех случаях, когда невозможно с достаточной достоверностью воспроизвести природные условия подземного выщелачивания, а также в тех случаях, когда неизвестны технические схемы отработки залежей. В этих случаях получаемые результаты считаются по абсолютным значениям от контрольных расчетов, но имеют практически идентичную качественную картину распределения участков месторождения с различными геотехнологическими характеристиками.

Результаты изучения геотехнологических условий месторождений рекомендуется представлять в виде геотехнологических разрезов по разведочным пробам, являющихся основой для проведения районирования месторождения.

Таким образом, на подземное выщелачивание оказывает влияние большое число факторов, а изучение геотехнологических условий месторождений является основой для количественной и качественной оценки взаимосвязей природных и промышленных компонентов природно-промышленной системы. При этом после выделения факторов, определяющих принципиальную пригодность месторождения к применению подземного выщелачивания, устанавливают факторы, которые требуют адаптации способа ПВ к конкретным геологическим и гидрогеологическим условиям [1; 5].

Заключение

Проведено исследование оценки возможности выщелачивания полезных компонентов из руд месторождений; приведены результаты промышленного внедре-

ния адаптационной концепции физико-химических геотехнологий при рациональном освоении ресурсов Мкужу Ривер в Танзании. Описаны результаты исследования выщелачивания полезных компонентов из руд с использованием больших по массе пробных руд в колоннах большого размера, которые позволяют получить более достоверные результаты при выщелачивании извлекаемого урана серной кислоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Абдульманов И.Г., Фазлуллин М.И., Мосев А.Ф., Пименов М.К.* Комплексы подземного выщелачивания. М.: Недра, 1992.
- [2] *Абрамов А.В., Ивановский Э.С., Синельщикова Н.В.* Подготовка месторождений скальных руд для выщелачивания. М.: Цветметинформация, 1975.
- [3] Геологи ВСЕГЕИ в создании урановорудной базы страны. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006. 160 с.
- [4] *Кротков В.В., Лобанов Д.П., Нестеров Ю.В., Абдульманов И.Г.* Горно-химическая технология добычи урана / под ред. В.В. Кроткова. М.: ГЕОС, 2001. 368 с.
- [5] *Громов Б.В.* Введение в химическую технологию урана. М.: Атомиздат, 1978. 336 с.
- [6] *Иванов В.Г., Култышев В.И., Колесаев В.Б. и др.* Оптимизация разработки сложноструктурных урановых месторождений. М.: Горная книга, 2007. 265 с.
- [7] *Иванов В.Г.* Перспективы подземного выщелачивания при разработке скальных месторождений. М.: ЦНИИАтоминформ, 1989.
- [8] *Толстов Е.А., Толстов Д.Е.* Физико-химические геотехнологии освоения месторождений урана и золота в Кызылкумском регионе. М.: Геоинформцентр, 2002. 284 с.

© Киселевский Е.В., Кумбикила Дж.К., Усова В.М., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 09 марта 2018

Дата принятия к печати: 30 апреля 2018

Для цитирования:

Киселевский Е.В., Кумбикила Дж.К., Усова В.М. Физико-химическая технология кучного выщелачивания на месторождении Мкужу Ривер в Танзании // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 2. С. 254–261. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-254-261

Сведения об авторах:

Киселевский Евгений Валентинович — кандидат технических наук, доцент, директор департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* применение методов подземного выщелачивания для решения экологических и экономических проблем для добычи уранового сырья в Танзании. *Контактная информация:* e-mail: kiselevskiy_ev@rudn.university

Кумбикила Джума Кассим — аспирант департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* применение методов подземного выщелачивания для решения экологических и экономических проблем для добычи уранового сырья в Танзании. *Контактная информация:* e-mail: kumbikila@yahoo.com

Усова Валентина Михайловна — старший преподаватель департамента геологии, горного и нефтегазового дела Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* применение методов подземного выщелачивания для решения экологических и экономических проблем для добычи уранового сырья в Танзании. *Контактная информация:* e-mail: usova_vm@pfur.ru

PHYSICO-CHEMICAL TECHNOLOGY OF HEAP LEACHING AT MKUJU RIVER DEPOSIT IN TANZANIA

E.V. Kiselevskiy, J.K. Kumbikila, V.M. Usova

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

Abstract. *Purpose.* The purpose of this work was to examine various aspects of the physico-chemical heap leaching technology at the Mkuju River in Tanzania. The objectives of the study were to determine the basic geotechnological conditions of the Mkuju River uranium deposit, conduct laboratory work on the study of various technological parameters and rock characteristics, as well as a thorough analysis of geotechnological zoning. *Methods.* The objectives of the research have been solved using the generally accepted methodological approaches to solving problems on ores with a disturbed and undisturbed material structure that have been selected from wells drilled at the Mkuju River Mine in Tanzania, which are being explored and exploited for uranium. *Results.* Based on the conducted studies, the main geotechnological and geological-hydrogeological conditions, natural factors and their influence were determined. Also, laboratory studies helped determine the technological parameters and their optimal values. *The conclusion.* Underground leaching is influenced by a large number of factors, and the study of geotechnological conditions of deposits is the basis for a quantitative and qualitative assessment of the interrelationships of natural and industrial components of the natural-industrial system. In this case, after determining the factors the adaptation of the in situ leaching method to specific geological and hydrogeological conditions is established.

Key words: uranium, sulfuric acid, carbonate solutions, calcium sulphate, carbonate method, solvent, mineral composition of ores, common uranium oxides

REFERENCES

- [1] Abdul'manov I.G., Fazlullin M.I., Mosev A.F., Pimenov M.K. Kompleksy podzemnogo vyshchelachivaniya [Underground leaching complexes]. Moscow: Nedra Publ., 1992. (In Russ.)
- [2] Abramov A.B., Ivanovskii E.S., Sinel'shchikova N.V. Podgotovka mestorozhdenii skal'nykh rud dlya vyshchelachivaniya [Preparation of ore deposits for leaching]. Moscow: Tsvetmetinformatsiya Publ., 1975. (In Russ.)
- [3] Geologi VSEGEI v sozdanii uranovorudnoi bazy strany [Geologists of VSEGEI in the creation of uranium ore base of the country]. Saint Petersburg: VSEGEI Publ., 2006. 160 p. (In Russ.)
- [4] Krotkov V.V., Lobanov D.P., Nesterov Y.V., Abdulmanov I.G. Gorno-khimicheskaya tekhnologiya dobychi urana [Mining-chemical technology of uranium extraction]. Under the editorship of Krotkov V.V. Moscow: GEOS Publ., 2001. 368 p. (In Russ.)
- [5] Gromov B.V. Vvedenie v khimicheskuyu tekhnologiyu urana [Introduction to the chemical technology of uranium]. Moscow: Atomizdat Publ., 1978. 336 p. (In Russ.)

- [6] Ivanov V.G., Kultyshev V.I., Kolesaev V.B., Litvinenko V.G., Sheludchenko V.G. Optimizatsiya razrabotki slozhnostrukturnykh uranovykh mestorozhdenii [Optimization of the development of complex-structure uranium deposits]. Moscow: Gornaya kniga Publ., 2007. 265 p. (In Russ.)
- [7] Ivanov V.G. Perspektivy podzemnogo vyshchelachivaniya pri razrabotke skal'nykh mestorozhdenii [Prospects of underground leaching in development of rock deposits]. Moscow: TsNIIAtominform Publ., 1989. (In Russ.)
- [8] Tolstov E.A., Tolstov D.E. Fiziko-khimicheskie geotekhnologii osvoeniya mestorozhdenii urana i zolota v Kyzylkumskom regione [Physical and chemical geotechnologies of development of uranium and gold deposits in Kyzylkum region]. Moscow: Geoinformtsentr Publ., 2002. 284 p. (In Russ.)

Article history:

Received: March 09, 2018

Accepted: April 30, 2018

For citation:

Kiselevskiy E.V., Kumbikila J.K., Usova V.M. (2018). Physico-chemical technology of heap leaching at Mkuju River deposit in Tanzania. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 254–261. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-254-261

Bio Note:

Evgeniy V. Kiselevskiy — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, director of the Department of Geology, Mining and Oil&Gas Engineering of the Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* application of underground leaching methods to solve environmental and economic problems for the extraction of uranium resource in Tanzania. *Contact information:* e-mail: kiselevskiy_ev@rudn.university

Juma Kassim Kumbikila — postgraduate student, Department of Geology, Mining and Oil and Gas Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* application of underground leaching methods to solve environmental and economic problems for the extraction of uranium resource in Tanzania. *Contact information:* e-mail: kumbikila@yahoo.com

Valentina M. Usova — senior lecturer of the Department of Geology, Mining and Oil and Gas Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* application of underground leaching methods to solve environmental and economic problems for the extraction of uranium resource in Tanzania. *Contact information:* e-mail: usova_ym@pfur.ru

ф. СП-1

ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

АБОНЕМЕНТ на журнал

ВЕСТНИК РУДН
Серия «Инженерные
исследования»

18230

(индекс издания)

Количество
комплектов:

на 2018 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

ПВ	место	литер

на журнал

18230

(индекс издания)

ВЕСТНИК РУДН

Серия «Инженерные исследования»

Стои- мость	подписки	_____ руб. ___ коп.	Количество комплектов:
	переадресовки	_____ руб. ___ коп.	

на 2018 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ф. СП-1

ФГУП «ПОЧТА РОССИИ»

АБОНЕМЕНТ на журнал

(индекс издания)

ВЕСТНИК РУДН

Серия _____

Количество комплектов:

на 2018 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)

ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА

ПВ	место	литер

на журнал

(индекс издания)

ВЕСТНИК РУДН

Серия _____

Стоимость	подписки	_____ руб. ____ коп.	Количество комплектов:	<input type="text"/>
	переадресовки	_____ руб. ____ коп.		

на 2018 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда

(почтовый индекс)

(адрес)

Кому

(фамилия, инициалы)