



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

2020 Том 21 № 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-2

<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, директор департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

Ткаченко Ирина Михайловна – кандидат технических наук, доцент департамента механики и мехатроники Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

Члены редакционной коллегии

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

Галишишникова Вера Владимировна – доктор технических наук, профессор, директор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

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

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

Калугин Владимир Тимофеевич – доктор технических наук, профессор, руководитель Научно-учебного комплекса специального машиностроения, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Коноплев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

Корнилова Анна Владимировна – доктор технических наук, профессор департамента строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

Малышев Вениамин Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа, Московский авиационный институт, Москва, Российская Федерация

Омельченко Ирина Николаевна – доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор, декан факультета инженерного бизнеса и менеджмента, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

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

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

Фомин Валерий Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных и тракторных двигателей, Московский государственный машиностроительный университет, Москва, Российская Федерация

Агравал Бридж – профессор Навал Постградуейт Скул, Монтерей, Калифорния, Соединенные Штаты Америки

Варатараджу Ренугант – профессор Университета Путра Малайзия, Сери Кембанган, Малайзия

Герман Анна – профессор Университета Бейра Интериор, Ковилья, Португальская Республика

Грациани Филиппо – профессор Римского университета «Ла Сапиенца», Рим, Итальянская Республика

Мисра Арун – профессор Университета МакГилл, Монреаль, Канада

Мортари Даниэль – профессор Техасского университета А & М, Колледж-Стейшен, Техас, Соединенные Штаты Америки

Спенсер Дэвид – профессор Университета штата Пенсильвания, Университи-Парк, Пенсильвания, Соединенные Штаты Америки

Фурфаро Роберто – профессор Университета Аризоны, Тусон, Аризона, Соединенные Штаты Америки

Хоулл Кэтлин – профессор, Университет Пердью, Уэст-Лафайетт, Индиана, Соединенные Штаты Америки

Ясика Тетсуо – почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

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

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

Периодичность 4 выпуска в год.

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

Языки: русский, английский.

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18230.

Цель и тематика

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

Научный журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» адресован научным работникам, инженерам, аспирантам, студентам старших курсов технических вузов. Включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК при Минобрнауки России. Выпуски журнала в полнотекстовом виде доступны в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) на платформе Научной электронной библиотеки (НЭБ) elibrary.ru, а также на сайте журнала <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

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

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

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

Подписано в печать 23.11.2020. Выход в свет 30.11.2020. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 6,51. Тираж 500 экз. Заказ № 444. Цена свободная.

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

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



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

2020 Volume 21 Number 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2020-21-2

<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, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

Associate Editor-in-Chief

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

Assistant to the Editor-in-Chief

Irina M. Tkachenko – Associate Professor, Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

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, Moscow, Russian Federation

Vera V. Galishnikova – Associate Professor, Director of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

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

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

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

Vladimir N. Konoplev – Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

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

Veniamin V. Malyshev – Professor, Head of the Department of System Analysis, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

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

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

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

Valeriy M. Fomin – Professor, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

Brij Agrawal – Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, California, United States of America

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

Anna Guerman – Professor, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portuguese Republic

Filippo Graziani – Professor, University Roma “La Sapienza”, Rome, Italian Republic

Arun Misra – Professor, McGill University, Montreal, Canada

Daniele Mortari – Professor, Texas A & M University, College Station, Texas, United States of America

David Spencer – Professor, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, United States of America

Roberto Furfaro – Professor, University of Arizona, Tucson, Arizona, United States of America

Kathleen Howell – Professor of the Purdue University, West Lafayette, Indiana, United States of America

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

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

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

Published 4 times a year.

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

Languages: Russian, English.

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

Aims and Scope

The journal publishes results of fundamental and applied research of Russian and foreign scientists on specific scientific research themes. The editorial board of the journal invites the cooperation of experts working in the field of aerospace engineering, mechanical engineering and machine science, Earth science. The purpose of the journal is to contribute the development of Russian engineering schools, promotion and implementation of modern promising research projects in these areas.

The scientific journal "RUDN Journal of Engineering Researches" is addressed to researchers, engineers, graduate students, senior students of polytechnical universities. The journal has been included in the list of the leading review journals and editions of the Highest Certification Committee of Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral Theses are to be published. The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>. The website contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, etc., as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

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

Address of the editorial board:

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

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

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

Printing run 500 copies. Open price.

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

Printed at RUDN Publishing House:

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Алленов Д.Г., Дейнова К.Б., Соломатин С.В., Лазаренко О.И.** Влияние вылета резца и глубины резания при токарной обработке на качество поверхностного слоя деталей машин 105

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Рыжов С.В., Рыльникова М.В., Есина Е.Н.** Особенности горно-геологических и горно-технических условий освоения золоторудного месторождения Рябиновое 113
- Абрамов В.Ю.** Некоторые особенности поляризации структуры электромагнитного поля на высоких частотах в геологических разрезах: математические решения и эксперименты 123

СТРОИТЕЛЬСТВО

- Плешивцев А.А., Галишникова В.В.** «Ренессанс» интеллектуального капитала, отображаемый в нетрадиционных (инновационных) приемах формирования архитектурных систем 131
- Жан Поль В., Эльбердов Т.А., Рынковская М.И.** 3D-моделирование геликоидов для использования в аддитивных технологиях 136
- Окольникова Г.Э., Тихонов Г.И., Гришин Г.Е.** Сцепление с бетоном новых видов арматурного проката для строительства 144

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

- Allenov D.G., Deinova K.B., Solomatin S.V., Lazarenko O.I.** Effect of fixing the pass-through turning tool in the tool holder on the roughness and surface macro deviations during turning 105

EARTH SCIENCE

- Ryzhov S.V., Rynnikova M.V., Esina E.N.** Geological and mining features of gold deposits development of Ryabinovoe gold deposit 113
- Abramov V.Yu.** Some peculiarities of the polarization structure of the electromagnetic field at high frequencies in geological sections: mathematical solutions and experiments 123

CIVIL ENGINEERING (CONSTRUCTION)

- Pleshivtsev A.A., Galishnikova V.V.** “Renaissance” of intellectual capital, which is displayed in non-traditional (innovative) methods at forming in architectural systems 131
- Jean Paul V., Elberdov T.A., Rynkovskaya M.I.** Helicoids 3D modeling for additive technologies 136
- Okolnikova G.E., Tikhonov G.I., Grishin G.E.** Adhesion to concrete of new types of rebar rolled products for construction 144



МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-2-105-112

УДК 621.91.01

Научная статья

Влияние вылета резца и глубины резания при токарной обработке на качество поверхностного слоя деталей машин

Д.Г. Алленов, К.Б. Дейнова, С.В. Соломатин, О.И. Лазаренко

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 20 мая 2020 г.

Доработана: 25 мая 2020 г.

Принята к публикации: 3 июня 2020 г.

Ключевые слова:

шероховатость поверхности, глубина резания, сила резания, вылет резца, статический анализ

Аннотация. Приведены результаты исследования процесса резания с целью определения влияния длины вылета токарного режущего инструмента из резцедержателя и сил резания, возникающих в процессе обработки, соответствующих разным величинам снимаемого слоя, на формирование качества поверхностного слоя деталей при точении. В качестве режущего инструмента в исследовании применялся токарный проходной резец PCLNR2525M12 со сменными пластинами из твердого сплава T15K6, а в качестве обрабатываемых заготовок – стальные цилиндрические заготовки диаметром $D = 40$ мм (марка стали – 30). Обработка резанием проводилась при трех различных глубинах резания, равных 0,4, 1, 1,5 мм. Скорость подачи и частота вращения шпинделя на протяжении всего эксперимента являлись константой и были равны $s = 0,1$ мм/об, $n = 1000$ об/мин соответственно. Методами математического моделирования определены геометрические отклонения резца от теоретической линии резания. В качестве оцениваемых параметров использовались линейные перемещения, образуемые вследствие напряженно-деформированного состояния резца. Представлена методика подготовки и проведения математического моделирования средствами системы трехмерного моделирования КОМПАС-3D и модуля APM FEM. Экспериментальным путем исследованы параметры шероховатости, возникающие при токарной обработке резцами с различной величиной вылета инструмента с разными режимами резания.

Введение

В настоящее время существуют различные способы изготовления деталей машин и механизмов, основным параметром геометрической точ-

ности которых является шероховатость – совокупность неровностей, образующих микрорельеф поверхности изделия в силу пластической деформации заготовки при ее обработке из-за трения и вибрации об инструмент, вырывания частиц материала с поверхности, неровностей режущих кромок резца [1; 2]. На процесс образования поверхностного слоя оказывает влияние совокупность одновременно действующих факторов, к основным из которых можно отнести методы обработки, тип и состояние технологической оснастки, физико-механические характеристики обрабатываемых заготовок, режимы резания (подача, глубина и скорость резания, ча-

Алленов Дмитрий Геннадьевич, ассистент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН; кандидат технических наук; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3663-1790>; eLIBRARY SPIN-код: 4589-8524; Scopus Author ID: 57191578730; Web of Science ResearcherID: AAC-4990-2019; allenov-dg@rudn.ru

Дейнова Кристина Борисовна, студентка 3-го курса бакалавриата департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Соломатин Сергей Викторович, студент 2-го курса магистратуры департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

Лазаренко Ольга Игоревна, студентка 2-го курса магистратуры департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

© Алленов Д.Г., Дейнова К.Б., Соломатин С.В., Лазаренко О.И., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

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

стота вращения шпинделя, длина вылета резца из резцедержателя, мощность и сила резания), геометрические способности режущих пластин инструмента, их режущие свойства, жесткость технологической системы, способность поглощать энергию вибрации (демпфирующая способность), наличие и качество смазочно-охлаждающих технологических средств и многое другое [1–7]. Шероховатость поверхности имеет преобладающее влияние на такие эксплуатационные свойства деталей, как износостойкость трущихся поверхностей, усталостная прочность, устойчивость к коррозии, поэтому данный параметр геометрической точности в технической характеристике изделия имеет важное значение в оценке его качества [8; 9].

1. Подготовка к эксперименту

В работе исследовано влияние глубины резания и вылета резца на шероховатость поверхности. В качестве режущего инструмента использовался токарный проходной резец PCLNR2525M12 со сменными пластинами из твердого сплава T15K6 (рис. 1) [10].

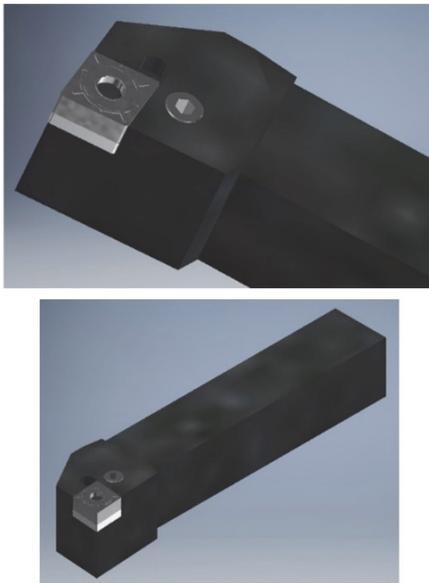


Рис. 1. Резец для наружного точения PCLNR2525M12 (автор 3D-чертежа – К.Б. Дейнова)
[Figure 1. External turning tool PCLNR2525M12 (author of the 3D drawing – Kristina B. Deinova)]

В качестве обрабатываемых заготовок применялись стальные цилиндрические заготовки диаметром $D = 40$ мм (марка стали – 30). Обработка заготовок проводилась на токарно-винто-

резном станке модели 16К20 при трех различных глубинах резания $t_1 = 0,4$ мм, $t_2 = 1$ мм и $t_3 = 1,5$ мм. В резцедержателе резец закреплялся двумя болтами. Скорость подачи и частота вращения шпинделя на протяжении всего эксперимента не изменялись и были равны $s = 0,1$ мм/об, $n = 1000$ об/мин соответственно. Фактическая скорость резания равнялась

$$V_{\phi} = \frac{\pi D n}{1000} = 126 \text{ м/мин.} \quad (1)$$

Стружкообразование при резании материалов осуществляется под действием силы резания P , которую принято раскладывать на направленные по осям координат составляющие: тангенциальную P_z , радиальную P_y и осевую P_x [11; 12], связанные между собой соотношениями $P_y = (0,25 - 0,5)P_z$, $P_x = (0,1 - 0,25)P_z$. Многочисленными исследованиями установлено, что в большинстве случаев сила резания примерно равна тангенциальной составляющей: $P_z \approx 0,9P$, именно поэтому практические расчеты проводились по силе P_z [11]. Сила резания P_z определялась по формуле [11]

$$N = 10C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot V_{\phi}^n \cdot K_p. \quad (2)$$

По полученным значениям тангенциальной силы и соответствующим им режимам резания (глубине и скорости резания, а также величине подачи) определялась мощность резания (табл. 1):

$$N = \frac{P_z V_{\phi}}{1020 \cdot 60}. \quad (3)$$

Таблица 1

Зависимость тангенциальной силы и мощности от глубины резания
[Table 1. Dependence of tangential force and power on the depth of cut]

Глубина резания, мм [Cutting depth, mm]	t	0,4	1	1,5
Тангенциальная составляющая силы резания, н [Tangential cutting force, n]	P_z	874	2185	3277
Мощность резания, кВт [Cutting power, kW]	N	1,8	4,5	6,7

2. Исследование отклонения реза методом компьютерного моделирования

Средствами системы трехмерного моделирования КОМПАС-3D и APM FEM произведен статический расчет для пяти вылетов (длина первого вылета равнялась 35 мм, остальные выполнены с шагом 10 мм). Резец, размеры державки которого составляют 25×25 мм, крепился в поворотном резцедержателе двумя болтами диаметром 16 мм.

Ко всем поверхностям созданной 3D-модели реза, прикладывалась температура, равная 20 °С. Резец крепился в поворотном резцедержателе двумя болтами, следовательно, для проведения анализа в качестве совпадающих задавались три поверхности (рис. 2).

При закреплении резец соприкасается верхней гранью державки с болтами (расстояние от рабочей части реза до первого болта – 38 мм), а нижней – с самим резцедержателем (расстояние от головки реза – 30 мм). В качестве величины вектора нагружения выбирались силы резания, указанные в табл. 1, материал образца – сталь.

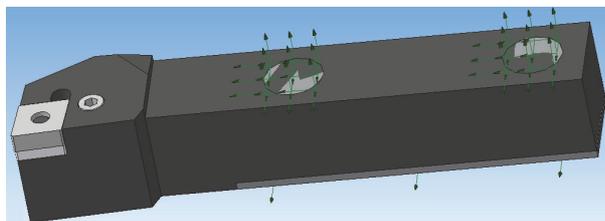


Рис. 2. Установка закреплений
[Figure 2. Installation of fixtures]

На последнем этапе построения модели задавались совпадающие поверхности и создавалась конечно-элементная сетка. Модель реза разбивалась на четыре узловые тетраэдры. Параметры операции выбирались из практических соображений: максимальное значение длины стороны элемента – 0,5, коэффициент сгущения на поверхности – 1 и коэффициент разрежения в объеме – 1,5. Полученное количество конечных элементов разбиения было равно 5861, узлов – 1896.

С целью выявления зависимости между длиной вылета реза и глубиной резания от отклонения инструмента из резцедержателя выполнялся статический расчет. Количество выбранных системой элементов равнялось 6235 (1896 узлов), степеней свободы – 5688 (443) [13]. Результат анализа пятого вылета реза с наибольшей силой резания представлен на рис. 3.

Приведенные карты построены в виде изообластей (количество изоуровней – 16) на основе деформированной конструкции, при этом значения в узлах усреднены. Масштабный коэффициент (коэффициент масштабирования перемещений для отрисовки деформированной конструкции) равен 100. Для стержней, пластин и объемных элементов выбирались суммарные линейные параметры перемещений (USUM).

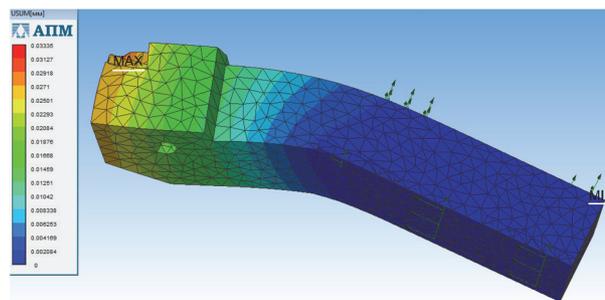


Рис. 3. Деформированная конструкция реза при пятом вылете и глубине резания 1,5 мм
[Figure 3. Deformed design of the tool with fifth overhang and the depth of cut of 1.5 mm wound]

Таблица 2

Зависимость тангенциальной силы и мощности от глубины резания
[Table 2. Dependence of tangential force and power on cutting depth]

Положение реза [Tool overhang]	Глубина резания t , мм [Cutting depth, mm]	Сила резания p , н [Cutting force, n]	Линейные перемещения, мм [Linear displacement, mm]
1	0,4	874	0,003497
	1,0	2185	0,008553
	1,5	3277	0,012990
2	0,4	874	0,003657
	1,0	2185	0,008960
	1,5	3277	0,013710
3	0,4	874	0,004710
	1,0	2185	0,011660
	1,5	3277	0,017660
4	0,4	874	0,006663
	1,0	2185	0,016500
	1,5	3277	0,024980
5	0,4	874	0,008895
	1,0	2185	0,022240
	1,5	3277	0,033350

Зависимости полученных линейных перемещений от величины снимаемого слоя с заготовки и длины вылета инструмента из резцедержателя представлены в табл. 2.

Проведенный статический анализ напряженно-деформированного состояния резца при разных вылетах резца и силах резания показал, что линейные перемещения находятся в прямой зависимости от вылета резца и глубины снимаемого слоя. Следовательно, наибольшей линейной деформации 33,35 мкм резец был подвержен при глубине резания 1,5 мм, которой соответствует сила резания 3277 Н, и пятом вылете резца (рис. 3).

Дополнительно при выводе результатов расчета для демонстрации заметных линейных перемещений были визуализированы деформированное и недеформированное состояние резца (рис. 4). Масштабный коэффициент выбран равным 100, чтобы более наглядно показать появляющийся под действием напряжений прогиб инструмента.

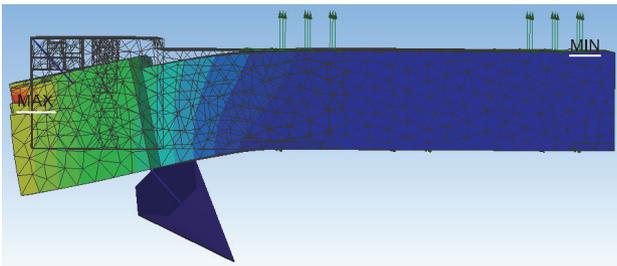


Рис. 4. Конструкция резца до и после деформации
[Figure 4. Tool design before and after deformation]

Зависимость между линейными перемещениями, возникающими в процессе резания, длиной вылета инструмента и глубиной снимаемого слоя представлена на рис. 5. Разница максимальных и минимальных значений отклонений инструмента при $t = 0,4$ мм составляет 5 мкм, при $t = 1$ мм – 15 мкм, при $t = 1,5$ мм – 16 мкм. Такое распределение значений отклонений по глубинам резания связано с положением инструмента в резцедержателе: при первом вылете державка всей своей гранью соприкасалась с резцедержателем, что незначительным образом сказывалось на отклонении инструмента. Из графика видно, что при каждой из рассмотренных длин вылета инструмента из резцедержателя суммарные отклонения возрастают с увеличением глубины резания. Однако при первом вылете инструмента линейные перемещения с возрастанием величины снимаемого слоя изменялись незначительно: разница

линейных перемещений при $t = 1$ мм и $t = 0,4$ мм примерно равна разнице линейных перемещений при $t = 1,5$ мм и $t = 1$ мм и составляет 5 мкм. Иная ситуация обстоит с максимальным вылетом резца. Разница линейных перемещений при $t = 1$ мм и $t = 0,4$ мм равна 15 мкм, а при $t = 1,5$ мм и $t = 1$ мм инструмент подвергся меньшей линейной деформации (6 мкм). Объясняется это стремлением к установившейся упругой деформации, связанной с механическими характеристиками материала. Иначе говоря, при достижении определенного значения линейных перемещений резец стал сопротивляться действующим на него нагрузкам с целью недопущения наступления пластического деформирования его конструкции.

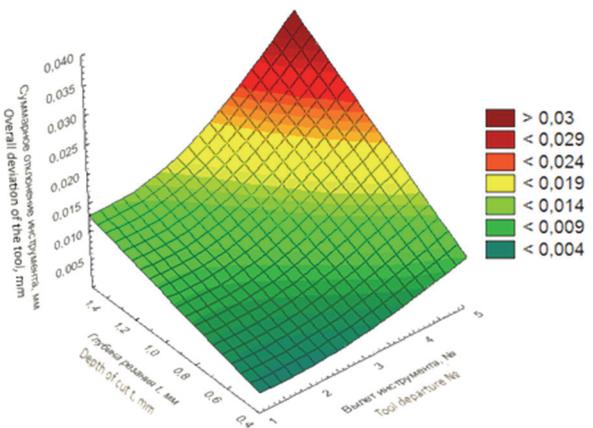


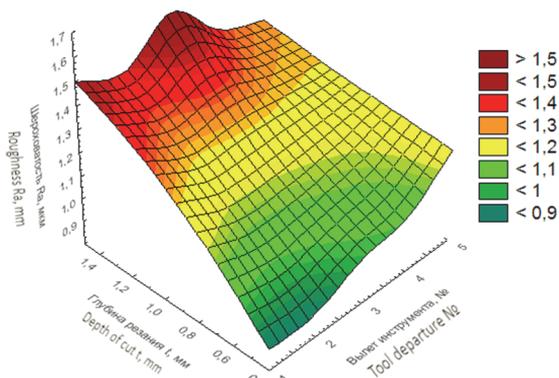
Рис. 5. График зависимости отклонения инструмента от его вылета и глубины резания
[Figure 5. Graph of the deviation of the tool from its overhang and depth of cut]

По полученным данным можно сделать вывод, что длина вылета резца и глубина снимаемого слоя с заготовки значительно влияют на отклонение инструмента, то есть по мере увеличения длины вылета инструмента и глубины резания возрастают отклонения инструмента в резцедержателе.

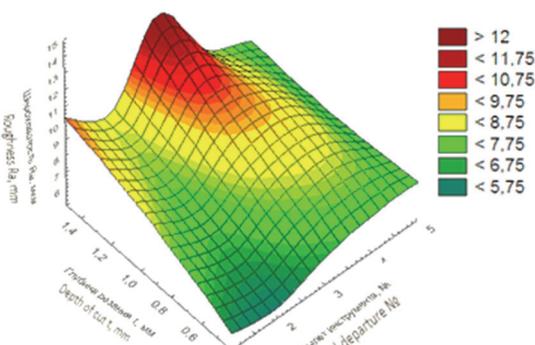
3. Исследование влияния вылета резца на шероховатость обработанной поверхности

Для подтверждения прямой зависимости между качеством поверхностного слоя и режимами резания контактным способом с помощью профилометра измерялись параметры шероховатости (рис. 6) [9]. По полученным данным можно сделать вывод, что вылет резца значительно влияет на шероховатость поверхности при обработке стали марки 30. При этом с увеличением длины

вылета резца от 0 до 50 мм параметры шероховатости поверхности увеличиваются на 30–40 % (рис. 6, а). Видимое резкое увеличение шероховатости при глубине резания 1,5 мм с первым и третьим вылетами резца объясняется тем, что при обработке заготовок возникала сливная лентообразная путанная стружка, которая при отводе из зоны резания обвивала обработанную поверхность, тем самым царапая ее [14]. Влияние глубины резания на шероховатость поверхности имеет прямо пропорциональную зависимость, что подтверждается в работах [1; 15]. Аналогичные зависимости наблюдаются и для R_z . Поскольку данный параметр применяется для нормирования неровностей значительно реже, то более подробная оценка зависимостей для него не проводилась.



а



б

Рис. 6. Графики зависимости параметров шероховатости R_a и R_z от вылета инструмента и глубины резания:
а – для параметра R_a ; б – для параметра R_z
[Figure 6. Graphs of roughness parameters R_a and R_z depending on tool overhang and depth of cut:
а – for parameter R_a ; б – for parameter R_z]

Для устранения влияния сливной стружки на шероховатость поверхности было использовано прерывистое резание, то есть чередование процесса резания (стружкообразования) и холостого хода: стружка дробилась на мелкие и легкоудаляемые компоненты. Данный метод резания позволил получить более подходящие для построения графика значения шероховатости (рис. 7). По графику видно, что отношение максимального значения шероховатости к минимальному при $t = 0,4$ мм составляет 1,3, при $t = 1$ мм – 1,1, при $t = 1,5$ мм – 1,2. Данные отношения показывают, что влияние вылета инструмента на шероховатость поверхности при разных глубинах резания неравномерно. Так как при проведении исследования геометрические параметры режущего инструмента (например, углы резца и радиус скругления режущего клина), режимы резания и материалы заготовки и токарной пластины не менялись, то основное влияние на образование неровностей оказывала вибрация, возникающая в процессе обработки в зоне контакта заготовки и инструмента. При этом в ходе многочисленных экспериментов установлено, что шероховатость улучшается при уменьшении вибрации, которая в свою очередь будет тем ниже, чем больше скорость резания, размер поперечного сечения режущего инструмента, жесткость технологической системы и меньше глубина резания, подача и вылет [1; 4; 6].

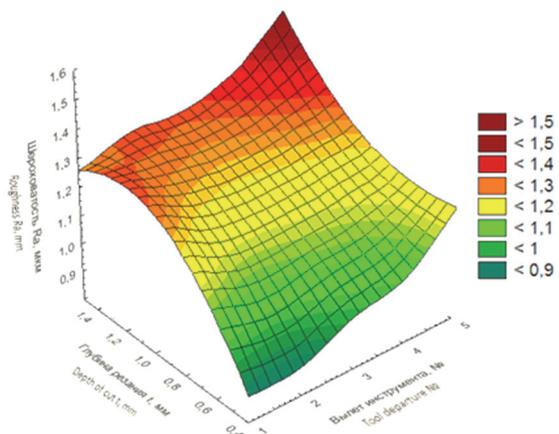


Рис. 7. График зависимости параметра шероховатости R_a от вылета инструмента и глубины резания при прерывистом резании
[Figure 7. Graph of the roughness parameter R_a versus tool overhang and depth of cut with intermittent cutting]

По полученным данным можно сделать вывод, что с увеличением длины вылета инструмента возрастает амплитуда колебаний, что и повышает шероховатость поверхности [16; 17].

Заключение

Следует отметить, что качество поверхностного слоя улучшается с уменьшением вибрации в зоне контакта заготовки и инструмента. В свою очередь на возникновение вибраций влияют многочисленные факторы, такие, например, как глубина резания и вылет резца. С ростом величины снимаемого с заготовки слоя и длины вылета инструмента наблюдается возрастание значений параметров шероховатости, а следовательно, ухудшается качество поверхностного слоя. Помимо этого, важно подчеркнуть, что возрастание значений вышеупомянутых режимов резания негативным образом сказывается и на возникновении линейных перемещений (отклонениях резца в резцедержателе). Иначе говоря, от глубины резания и вылета резца напрямую зависят прочность и износостойкость инструмента, а также качество обработки деталей.

Список литературы

1. Сулов А.Г. Инженерия поверхности деталей. М.: Машиностроение, 2008. С. 320.
2. Григорьев С.Н. и др. Резание материалов. Режущий инструмент: в 2 ч. Ч. 1: учебник для вузов / под общ. ред. Н.А. Чемборисова. М.: Юрайт, 2020. 263 с.
3. Безъязычный В.Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин // Инженерный журнал. Каталог. 2000. № 4. С. 9–16.
4. Козочкин М.П., Алленов Д.Г., Андриященко И.С. Использование виброакустического мониторинга для стабилизации напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя заготовки при резании // Заметки по машиностроению: материалы 4-й Международной конференции по промышленной инженерии. 2018. С. 1355–1363.
5. Алленов Д.Г. Исследование влияния износа режущей кромки инструмента на чистоту поверхности // Технология машиностроения. 2016. № 4–16. С. 12–16.
6. Thomas M. Effect of tool vibrations on surface roughness during dry turning // *Computers & Industrial Engineering*. 1996. Vol. 31. No. 3–4. Pp. 637–644. doi: 10.1016/s0360-8352(96)00235-5.

7. Rogov V.A., Gorbani S. Исследование рабочих параметров резцов для чистовой обработки // *Фундаментальные исследования*. 2013. Т. 11. № 3. С. 435–440.

8. Алленов Д.Г., Копылов В.В., Ба Т.М., Камара А. Исследование влияния качества поверхностного слоя на эксплуатационные характеристики детали // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 6. С. 30–34.

9. Маркова Т.В., Крыжановская И.М. Шероховатость поверхности: метод. указания. СПб.: Политехн. ун-та, 2006. С. 32.

10. Лим Т. Оптимизация выбора инструмента // *Международный научно-производственный журнал*. 2001. Т. 39. № 6. С. 1239–1256.

11. Дальский А.М., Косилова А.Г., Мецержков Р.К., Сулов А.Г. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 1. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. С. 562.

12. Парфеньева И.Е. Технология конструкционных материалов. Общая характеристика обработки резанием: учеб. пос. М.: МАМИ, 2012. С. 454.

13. Ambati R., Yuan H. FEM mesh-dependency when modeling the cutting process // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 53. No. 1–4. Pp. 313–323. doi: 10.1007/s00170-010-2818-9.

14. Вульф А.М. Резание металлов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1973. С. 496.

15. Корсаков В.С. Точность механической обработки. М.: Машгиз, 1961. С. 397.

16. Алленов Д.Г., Козочкин М.П., Андриященко И.С. Контроль напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя детали в процессе резания с использованием виброакустической диагностики // *Международная конференция по современным тенденциям развития производственных технологий и оборудования*. 2017. Т. 129. doi: 10.1051/mateconf/201712901032.

17. Chen J.C., Chen W.L. Tool failure detection system using an accelerometer sensor // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 1999. Vol. 10. No. 2. Pp. 187–197. doi: 10.1023/A:1008980821787.

Для цитирования

Алленов Д.Г., Дейнова К.Б., Соломатин С.В., Лазаренко О.И. Влияние вылета резца и глубины резания при токарной обработке на качество поверхностного слоя деталей машин // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2020. Т. 21. № 2. С. 105–112. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-105-112>

Effect of fixing the pass-through turning tool in the tool holder on the roughness and surface macro deviations during turning

Dmitry G. Allenov, Kristina B. Deinova, Sergey V. Solomatin, Olga I. Lazarenko

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

Article history:

Received: May 20, 2020

Revised: May 25, 2020

Accepted: June 3, 2020

Keywords:

surface roughness, depth of cut, cutting force, tool overhang, static analysis

Abstract. The scientific work represents a research of the cutting process in order to determine the influence of the cutting tool extension's length from the tool holder and the cutting forces that occur during processing and corresponding to different values of the removed layer on the formation of the quality of the surface layer of parts during turning. As a cutting tool, the research used a PCLNR2525M12 straight-turning tool with replaceable T15K6 carbide inserts. Steel cylindrical workpieces with a diameter $D = 40$ mm (steel grade – 30) were used as workpieces. Cutting was carried out at three different cutting depths: 0.4, 1, 1.5 mm. The feed rate and spindle speed throughout the experiment were constant and were equal to $s = 0.1$ mm/rev, $n = 1000$ rpm, respectively. The geometric deviations of the cutter from the theoretical cutting line were determined by mathematical modeling methods. Linear displacements formed due to the stress-strain state of the cutter were used as estimated parameters. The study presents the methodology for preparing and conducting mathematical modeling using the three-dimensional modeling system KOMPAS-3D and APM FEM module. The roughness parameters that occur during turning by cutters with different tool extension with different cutting modes were studied experimentally.

References

1. Suslov AG. *Inzheneriya poverkhnosti detaley* [Part surface engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2008. (In Russ.)

2. Grigorev SN, et al. *Rezanie materialov. Rezhushchij instrument* [Cutting materials. Cutting tool] (part 1). Moscow: Yurajt Publ.; 2020. (In Russ.)

3. Bezyazychnyy VF. Vliyaniye kachestva poverkhnostnogo sloya posle mekhanicheskoy obrabotki na ekspluatatsionnyye svoystva detaley mashin [The influence of the quality of the surface layer after machining on the performance properties of machine parts]. *Engineering Journal*. 2000;(4): 9–16. (In Russ.)

Dmitry G. Allenov, Ph.D., Assistant of Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Academy of Engineering of RUDN University; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3663-1790>; eLIBRARY SPIN-code: 4589-8524; Scopus Author ID: 57191578730; Web of Science ResearcherID: AAC-4990-2019; allenov-dg@rudn.ru

Kristina B. Deinova, undergraduate student of Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Academy of Engineering of RUDN University.

Sergey V. Solomatin, master student of Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Academy of Engineering of RUDN University.

Olga I. Lazarenko, master student of Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering of Academy of Engineering of RUDN University.

4. Kozochkin M, Allenov D, Andryushchenko IS. Use of vibro-acoustic monitoring for stabilization stress-strain state of surface layer of workpiece during cutting. *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of 4th International Conference on Industrial Engineering 2018*. 2018. p. 1355–1363. (In Russ.) doi: 10.1007/978-3-319-95630-5_143.

5. Allenov DG. Issledovaniye vliyaniya iznosa rezhushchey kromki instrumenta na chistotu poverkhnosti [Study of the effect of wear of the cutting edge of the tool on the surface cleanliness]. *Mechanical Engineering*. 2016;4(16):12–16. (In Russ.)

6. Thomas M. Effect of tool vibrations on surface roughness during dry turning. *Computers & Industrial Engineering*. 1996;31(3–4):637–644. doi: 10.1016/s0360-8352(96)00235-5.

7. Rogov VA, Gorbani S. Influence of the handle design on a composite lathe cutter. *Russian Engineering Research*. 2013;11(3):435–440. (In Russ.) doi: 10.3103/s1068798x15010220.

8. Allenov DG. Issledovaniye vliyaniya kachestva poverkhnostnogo sloya na ekspluatatsionnyye kharakte-

ristiki detali [The study of the influence of the quality of the surface layer on the performance characteristics of the part]. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2018;(6):30–34. (In Russ.)

9. Markova TV, Kryzhanovskaya IM. *Sherokhovatost' poverkhnosti* [Surface Roughness]. Saint Petersburg: Polytechnic University Press; 2006. (In Russ.)

10. Lim T. Optimization of tool selection. *International Journal of Production Research*. 2001;39(6):1239–1256.

11. Dalsky AM, Kosilova AG, Meshcheryakov RK, Suslov AG. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [Reference Book of Technologist-Mechanical Engineer]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2001. (In Russ.)

12. Parfeneva IE. *Tekhnologiya konstruktsionnykh materialov. Obshchaya kharakteristika obrabotki rezaniyem* [Technology of construction materials. General characteristics of machining]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2012. (In Russ.)

13. Ambati R, Yuan H. FEM mesh-dependency when modeling the cutting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011;53(1–4):313–323. doi: 10.1007/s00170-010-2818-9.

14. Wolf AM. *Rezaniye metallov* [Metal cutting]. Leningrad: Mashinostroenie Publ.; 1973. (In Russ.)

15. Korsakov VS. *Tochnost mekhanicheskoy obrabotki* [Accuracy of machining]. Moscow: Mashgiz Publ.; 1961. (In Russ.)

16. Allenov D, Kozochkin M, Andryushchenko IS. Monitoring of the stress-strain state of the surface layer of a part in the cutting process using vibroacoustic diagnostics. *MATEC Web of Conferences*. 2017:129. doi: 10.1051/mateconf/201712901032.

17. Chen JC, Chen WL. Tool failure detection system using an accelerometer sensor. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 1999;10(2):187–197. doi: 10.1023/A:1008980821787.

For citation

Allenov DG, Deinova KB, Solomatina SV, Lazarenko OI. Effect of fixing the pass-through turning tool in the tool holder on the roughness and surface macro deviations during turning. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020; 21(2):105–112. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-105-112>



НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-2-113-122

УДК 622.342

Научная статья

Особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудного месторождения Рябиновое

С.В. Рыжов^{a,b}, М.В. Рыльникова^a, Е.Н. Есина^{a,c}

^aИнститут проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Российская Федерация, 111020, Москва, Крюковский тупик, д. 4

^bПАО «Селигдар», Российская Федерация, 115035, Москва, ул. Пятницкая, д. 13, стр. 2

^cРоссийский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

История статьи:

Поступила в редакцию: 2 мая 2020 г.

Доработана: 10 мая 2020 г.

Принята к публикации: 11 мая 2020 г.

Ключевые слова:

золоторудное месторождение Рябиновое, комплексное освоение, горно-геологические условия, горнотехнические условия, эффективность, открытая геотехнология, дифференцированный подход

Аннотация. Значимая роль золотодобывающей промышленности в развитии минерально-сырьевого комплекса России предопределила поиск новых организационно-технических и геотехнологических решений для повышения полноты и эффективности освоения месторождений. Большинство золоторудных месторождений России находится в труднодоступных малонаселенных районах, где ощущается недостаток в энергетических, транспортных коммуникациях, инфраструктуре. Показано, что золоторудное месторождение Рябиновое, расположенное в Республике Саха (Якутия), характеризуется сложной структурой, относительно неглубоким залеганием рудных залежей и широким разбросом ценности минерального сырья. Особенности месторождения Рябиновое заключаются в сложном структурном строении и чередовании оруденелых золотоносных и слабозолотоносных или безрудных участков различной мощности и сложной морфологии. Уточнены и обоснованы основные критерии открытой геотехнологии, обеспечивающие безопасную и эффективную разработку месторождения Рябиновое с достижением максимально возможного совокупного дисконтированного дохода за наименьший срок окупаемости проекта. В целом стратегия освоения запасов золоторудного месторождения Рябиновое основывается на комплексном подходе, обеспечивающем повышение уровня извлечения полезных компонентов и увеличение объемов товарной продукции с дифференцированным подходом к выбору способа переработки руд различного качества. Показано, что достижение рациональной производственной мощности при комплексном освоении золоторудного месторождения Рябиновое основано на оптимизации варьирования бортового и среднего содержания золота в руде и перерабатываемой рудной массе с обоснованием соотношения производственной мощности добычного и перерабатывающего цикла.

Рыжов Сергей Владимирович, председатель Совета директоров золото- и оловодобывающей компании ПАО «Селигдар»; научный сотрудник ИПКОН РАН.
Рыльникова Марина Владимировна, заведующая отделом теории проектирования освоения недр ИПКОН РАН; доктор технических наук, профессор; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9984-5980>, eLIBRARY SPIN-код: 9908-2312, Web of Science ResearcherID: E-4678-2014.

Есина Екатерина Николаевна, старший научный сотрудник ИПКОН РАН; доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН; кандидат технических наук, доцент; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1685-2406>, eLIBRARY SPIN-код: 9090-9868, ResearcherID: E-6092-2017; esina-en@rudn.ru

© Рыжов С.В., Рыльникова М.В., Есина Е.Н., 2020

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

Введение

Высокая роль золотодобывающей промышленности в развитии минерально-сырьевого комплекса России, возросшая в связи с мировым экономическим кризисом, предопределила поиск новых организационно-технических и геотехнологических решений для повышения полноты и эффективности освоения месторождений [1–8].

В этой связи представляет интерес анализ горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудного месторождения Рябиновое, имеющего сложную структуру и характеризующегося не глубоким залеганием рудных залежей и широким разбросом ценности минерального сырья.

Общая характеристика золоторудного месторождения Рябиновое

Золоторудное месторождение Рябиновое находится на территории Алданского муниципального района Республики Саха (Якутия). Оно расположено на правом берегу реки Якоцит в 44 км

к северо-востоку от административного центра г. Алдана (рис. 1) в восточной части массива мезозойских щелочных пород и представлено двумя участками – Мусковитовый и Новый. Более рудоносным является участок Мусковитовый, расположенный в районе слияния ручьев Сульфидный и Мусковитовый, последний является левым притоком ручья Рябиновый. Площадь участка составляет около 4 км², на нем выделено пять рудовмещающих залежей – Северная, Западная, Восточная, Южная и Центральная [9].

Северная залежь прослежена по простиранию на расстояние 600 м (до ее выклинивания), по падению на глубину 170 м (до отметки +746 м). Мощность залежи колеблется от 30 до 145 м и в среднем составляет 83 м. Ширина увеличивается с севера на юг (от 30 до 145 м) и практически не меняется даже при выклинивании на южном фланге. Среднее содержание золота по рудным проявлениям колеблется от 0,88 до 8,55 г/т, составляя в среднем по рудной залежи 1,74 г/т. В штотверке Северной залежи сосредоточено около 22 % от общих запасов золота по месторождению.



Рис. 1. Расположение месторождения Рябиновое [8]
[Figure 1. Location of the Ryabinovoe gold deposit [8]]

Центральная залежь – пластообразная, характеризуется переменной мощностью 38÷56 м и углом падения до 30°. По падению протяженность залежи прослеживается на глубину 85 м от основания ранее отработанного карьера и залегает на глубине 30–70 м от поверхности. Верхние горизонты Центральной рудной залежи были отработаны в 1990–1994 гг., ее ширина меняется по простиранию от 40 м в местах пережима до 260 м на северо-западном фланге. Центральная залежь характеризуется сравнительно высоким уровнем содержания золота по отношению к другим руд-

зонтами Центральной рудной залежи были отработаны в 1990–1994 гг., ее ширина меняется по простиранию от 40 м в местах пережима до 260 м на северо-западном фланге. Центральная залежь характеризуется сравнительно высоким уровнем содержания золота по отношению к другим руд-

ным залежам месторождения Рябиновое. Среднее содержание по рудопроявлениям составляет 3,90 г/т, изменяясь от 1,04 до 17,8 г/т. Количество запасов, сосредоточенных в Центральной залежи, – около 11 % от общих запасов золота по данному месторождению.

Западная залежь расположена к юго-западу от залежи Центральная и приурочена к лежащему северо-западному контакту щелочных базальтоидов с измененными мусковитизированными сиенитами [8]. Западная залежь залегает субсогласно положению лежащего бока базальтовой дайки, погружающейся под углом 75–85° в юго-восточном направлении, характеризуется неправильной формой и невыдержанной мощностью. На северо-восточном фланге залежь выходит под четвертичные отложения, на юго-западном она находится на глубине 10–55 м. По простиранию залежь прослежена на 235 м, по падению – до отметки +607 м на глубину до 120 м. Ее мощность колеблется от 10 до 67 м и составляет в среднем 41 м. Содержание золота по рудным проявлениям меняется от 0,86 до 10,6 г/т и в среднем составляет 2,51 г/т. Запасы Западной залежи включают около 9 % от общих запасов месторождения.

Южная залежь располагается в 60–70 м к юго-западу от залежи Западная и приурочена к трещинным структурам субпараллельным северо-западному контакту тела щелочных базальтоидов. Оруденение локализуется в щелочных сиенитах в экзоконтактной зоне дайки, иногда примыкая непосредственно к щелочным базальтоидам. Залежь имеет удлиненную форму и прослежена по простиранию на 280 м при средней ширине в 50 м. Практически на всем своем протяжении она выходит на поверхность. Залегание залежи – крутое с падением на юго-восток под углом 70–80°. Мощность – от 2 до 85 м, в среднем 37 м. Среднее содержание золота составляет 3 г/т, изменяясь от 1,0 до 7,0 г/т. Запасы Южной залежи составляют около 13 % от общих запасов золота по месторождению.

Протяженность Восточной залежи значительна – до 560 м, ширина в среднем составляет 58 м. Средняя мощность залежи – 25 м, с вариациями от 2,5 до 60 м. Среднее содержание золота 1,56 г/т, колеблется от 0,67 до 6,1 г/т. Восточная рудная залежь содержит около 7 % запасов золота от общих запасов месторождения.

Обособленно от Мусковитового участка расположен участок Новый. На нем находится лишь

одна залежь – крупный золотоносный шток эпидейцитовых сиенитов. Рудная залежь прослежена на поверхности (+1040 м), на штольневом горизонте (+940 м) и ниже на глубину около 400 м. Золотосульфидная минерализация на участке Новый изучена в интервале глубин +625 ÷ +1040 м. Она приурочена к телу эпидейцитовых сиенитов и в его объеме встречается повсеместно, но степень концентрации золотоносных руд весьма неравномерная. Более богатое оруденение высокой сплошности тяготеет преимущественно к крайним частям тела эпидейцитовых сиенитов, его центральная часть насыщена рудными скоплениями в значительно меньшей степени. Параметры рудных интервалов, как в плане, так и в разрезе, изменяются в широких пределах. В плане мощность рудных интервалов колеблется от 3 до 52 м, при среднем содержании золота от 1,03 до 2,11 г/т. В разрезе диапазон изменений мощности рудных интервалов еще шире – от первых сотен метров до 3 м. Среднее содержание золота в продуктивной части залежи составляет 2,2 г/т при варьировании от 0,87 до 17,75 г/т. В рудной залежи участка Новый сосредоточено 38 % общих запасов месторождения.

Особенности геологических и горнотехнических условий

Особенности месторождения Рябиновое заключаются в сложном структурном строении и чередовании оруденелых золотоносных и слабо-золотоносных или безрудных участков различной мощности и сложной морфологии [9]. Оконтуривание минерализованных зон из-за их прерывистого внутреннего строения носит условный характер. Промышленные рудные скопления, разделенные с бедными некондиционными рудными прослоями, не связаны между собой и геометризовать их в единое рудное тело не представляется возможным. В связи с этим они учитываются в обобщенных границах минерализованных зон (рудных залежей) статистически с применением коэффициента рудоносности, который весьма изменчив и варьирует по отдельным блокам от 0,20 до 0,77, в среднем составляя 0,43. Это показывает определенные сложности при выборе технологии управления качеством рудной массы при открытой разработке месторождения.

Распределение ценного компонента внутри рудных участков отличается неравномерным гнездо-

образным характером. Длина рудных интервалов в среднем составляет 14,7 м, изменяясь в пределах $0,7 \div 170$ м.

При этом в целом золотосодержащие руды месторождения Рябиновое представляют собой единый геологический тип – штокверковый, включающий сульфидное золото, в объеме которого выделяются три природноизмененные разновидности руд: первичные сульфидные, полуокисленные смешанные, окисленные. При содержании 80–90 % сульфидов руды относятся к сульфидным, менее 50 % – к окисленным, при промежуточных количествах сульфидов – к смешанным.

Кроме золота в рудах присутствуют в незначительных количествах медь, свинец, мышьяк, цинк, сера, серебро. Количество попутных компонентов (за исключением серебра) в рудах месторождения Рябиновое непромышленное, с содержанием на уровне десятых, сотых и тысячных долей процента.

При выборе параметров открытой геотехнологии учтены особенности структурного строения массива и физико-механические характеристики горных пород.

Наличие зон ослабления в массиве связано с развитием экзогенной и в меньшей степени тектонической трещиноватости. Общий модуль трещиноватости – 2–7 ед/м, породы – слабо- и среднетрещиноватые, слабовыветрелые, устойчивые и весьма устойчивые. Среднее значение плотности руды месторождения Рябиновое принято равным 2530 кг/см^3 . Влажность первичных руд и вмещающих пород – 0,8–1,9 %, смешанных руд – 2,0–2,2 %, окисленных руд – 2,8–3,1 %. Пористость горных пород изменяется от 5,0 до 10,3 %, максимальные значения характерны для окисленных разностей.

Крепость руды и породы по шкале профессора М.М. Протоdjаконова составляет 14–16. В целом руды и породы месторождения Рябиновое относятся к весьма крепким. Породы, слагающие месторождение, характеризуются минимальной размокаемостью, высокой прочностью и малой деформируемостью. Категория пород по буримости XIV–XVI. Интенсивное распространение многолетней мерзлоты отмечено на участке Новом, а также по левому борту ручья Сульфидного. Глубина ее распространения составляет первые сотни метров.

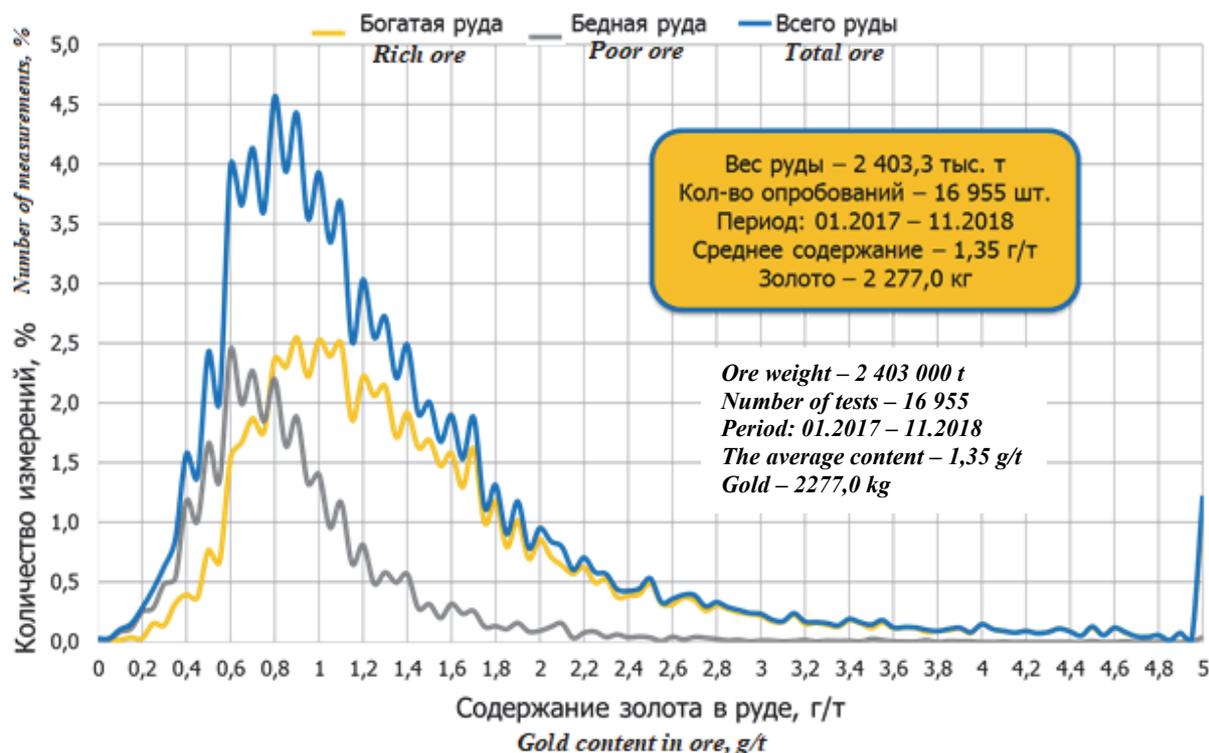


Рис. 2. График статистики распределения содержания полезного компонента в руде на месторождении Рябиновое
[Figure 2. Statistics graph of the content distribution of the useful component in the ore at the Ryabinovoe deposit]

Составлению вариантов календарного графика разработки месторождения Рябиновое с целью расчета трех показателей оптимизации – денежного потока, величины чистой приведенной стоимости и срока окупаемости проекта – предшествовало построение статистики распределения содержания полезного компонента в руде. Формирование данного графика осуществлено на основе 16 955 посамосвальных опробований руды, извлеченной из недр в период с января 2017 г. по ноябрь 2018 г. По каждому опробованию

фиксировалось значение его массы и среднего содержания полезного компонента. Статистические сведения о распределении содержания полезного компонента в руде на основе данных посамосвальных опробований представлены на рис. 2.

При подсчете запасов на месторождении Рябиновое к балансовым отнесены все запасы, находящиеся в экономически обоснованном контуре карьера. Запасы за пределами этого контура отнесены к забалансовым (табл. 1) [8].

Таблица 1

Сводный подсчет промышленных запасов месторождения Рябиновое
[Table 1. Summary calculation of industrial reserves of the Ryabinovoe deposit]

Категория [Category]	Запасы руды, тыс. т [Ore reserves, thous. t]	Содержание, г/т [Content, g/t]		Запасы, кг [Reserves, kg]	
		Au	Ag	Au	Ag
C ₁	5713,2	2,17	4,31	12394,6	24625,2
C ₂	3800,2	1,99	4,21	7568,2	16002,7
C ₁ + C ₂	9513,4	2,10	4,27	19962,8	40627,9

Таблица 2

Производительность карьеров по горной массе на месторождении Рябиновое в ходе ввода карьеров в эксплуатацию
[Table 2. The pit capacity of the rock mass at the Ryabinovoe deposit]

Карьер [Pit]	Производительность по годам, тыс. м ³ /год [Annual productivity, 1000 m ³ /year]			
	1-й [1 st]	2-й [2 nd]	3-й [3 rd]	4-й и последующие [4 th and next]
Северный [Northern]	–	180	280	300
Центральный [Central]	–	–	90	220
Южный [South]	–	70	130	130
Новый [New]	250	250	250	350
Итого [Total]	250	500	750	1000

Отработка всех залежей на месторождении Рябиновое ведется одновременно четырьмя карьерами, начиная с четвертого года эксплуатации. Разработка запасов участка Мусковитовый осуществляется карьерами Северный (отрабатывает Северную залежь), Центральный (осуществляет горные работы по добыче запасов Центральной, Западной и Восточной залежей), Южный (производит выемку запасов Южной залежи). На участке Новый отработка запасов ведется одноименным карьером Новый.

Принятая производительность карьеров по годам отработки представлена в табл. 2.

В процессе развития добычных работ контуры трех карьеров Северный, Восточный и Южный на участке Мусковитовый объединятся в один, где будут выделены как нагорная зона с разомкнутыми горизонтами, имеющими непосредственный выход на поверхность, так и общая углу-

бочная зона. Условия вскрытия рудных залежей нельзя назвать благоприятными в связи со сложным рельефом и значительным разбросом уклона поверхности в нагорной части. Глубина более 100 м предусмотрена только на карьере Новый.

Для отработки месторождения формируются система капитальных технологических автодорог, обеспечивающая грузотранспортную связь с обогатительной фабрикой и отвалами пустых пород, и система скользящих съездов [8; 10; 11]. К границам конечных контуров карьеров капитальные выездные траншеи подведены: к карьере Северный – с запада к горизонту 800 м; карьере Центральный – с запада к горизонту 730 м; карьере Южный – с запада к горизонтам 740 и 860 м; карьере Новый – с севера к горизонту 940 м, с юго-запада к горизонту 1040 м. Начиная со второго года эксплуатации, транспортная связь с карьером Новый организуется через берму гори-

зонта 860 м карьера Южный. Транспортная связь с промежуточными горизонтами осуществляется по временным автодорогам, прокладываемым по рельефу поверхности и внутренним скользящим съездам. Формирование единой логистической системы способствует существенному сокращению эксплуатационных затрат на добычу руды. С выше-лежащих горизонтов породы перемещаются на горизонт погрузки бульдозерами.

Карьеры отрабатываются сверху вниз уступами высотой 10 м по вскрыше и 5÷10 м по руде. Вскрытие эксплуатационных горизонтов карьеров осуществляется полутраншеями, имеющими заезды как непосредственно с поверхности, так и с использованием внутренних скользящих съездов. Проходка разрезных траншей ведется по простиранию рудных тел.

Начало добычных работ на карьерах организуется с горизонтов: карьер Северный – 930 м; карьер Центральный – 820 м; карьер Южный – 860 м; карьер Новый – 1040 м.

Для отработки нижних горизонтов карьеров будут формироваться постоянные и временные

наклонные транспортные съезды. Уклон транспортных берм принят 80%.

Основные параметры горнотехнической системы определены на основе принятой геотехнологии и выбранного технологического оборудования (табл. 3) [8].

Подготовка массива горных пород к выемке предусмотрена буровзрывным способом. Бурение по руде и по породе производится станками шарошечного бурения [8; 9]. Предусмотрена послонная выемка рыхлых вскрышных пород в нагорной части карьеров, их бульдозерная транспортировка в бурты, дальнейшая погрузка в автосамосвалы для перемещения во внешний отвал.

Основные параметры горнотехнических систем при открытой разработке месторождения Рябиновое определены в соответствии с действующими в Российской Федерации нормативными требованиями с учетом оптимизации производственной мощности и режима развития горных работ на карьерах основных структурных подразделений по добыче и переработке разнообразных руд.

Таблица 3

Основные параметры элементов системы разработки на карьерах месторождения Рябиновое [8]
[Table 3. Main parameters of development system elements [8]]

Параметры [Parameters]	Значения [Value]
Высота рабочего уступа [The working bench height]:	
– по руде [for the ore]	5–10 м
– по вскрыше [for the rock]	10 м
Высота уступа при погашении [The ledge height]	20 м
Угол откоса [Slope angle]:	
– рабочего уступа [working ledge]	75°
– при погашении по вмещающим породам [for the rock]	70°
– в наносах [in the sediment]	45°
Ширина предохранительной бермы [Safety berm width]	7 м
Минимальная ширина основания разрезной траншеи [Minimum width of the split trench base]	23 м

Стратегия комплексного освоения запасов золоторудного месторождения Рябиновое

Отличительной особенностью проектирования разработки месторождения Рябиновое является разделение добытой руды на два разных процесса – переработки и промежуточного складирования части добытой руды. Первая, самая большая часть добытой руды с наибольшим содержанием золота будет направляться на золотоизвлекательную фабрику (ЗИФ) с извлечением 86 % золота. Вторая часть руды – с наименьшим содержанием золота – перерабатываться методом кучного выщелачивания (КВ) с показателем из-

влечения около 65 % [12]. Третья часть руды – складироваться для переработки в будущем.

В результате построения нескольких допустимых по горнотехническим условиям вариантов календарного графика добычи и переработки руды месторождения Рябиновое и их апробации в производственно-финансовой модели предприятия был определен наиболее эффективный вариант. Критериями оптимизации являлись максимизация дисконтированного денежного потока и, как следствие, чистой приведенной стоимости разработки месторождения и минимизация срока окупаемости инвестиций.

Реализация комплексного подхода в совокупности с достижением максимально возможной полноты и эффективности освоения месторождения осуществляется в результате выбора наилучшего сочетания физико-технических и физико-химических методов извлечения и переработки основных и попутных компонентов кондиционных и бедных типов руд, а также грамотной эксплуатации или утилизации образующихся отходов горнодобывающего производства [13–16].

В общем случае потенциал применения комплексного подхода к рациональному освоению недр зависит от основных факторов [17–18]:

– геологических, предусматривающих наличие полезных ископаемых в недрах месторождений, а также прочих видов природного и техногенного сырья;

– технических, обуславливающих возможность наиболее полного извлечения полезных компонентов в процессе добычи и переработки руды, а также контроля и минимизации негативного экологического воздействия;

– экономических, основанных на достижении положительной разницы дисконтированных денежных потоков между доходами проекта комплексной разработки месторождения и затратами на реализацию такого проекта.

В сложных природно-климатических и горнотехнических условиях причиной эффективного освоения запасов месторождения Рябиновое является дифференцированный подход к выбору способа переработки руд различного качества с обоснованием рациональной структуры производственных мощностей рудника и перерабатывающих производств [19–21]. Реализация данного подхода предполагает изучение потенциального участка разработки для обоснования стратегии его освоения и проектирования горнотехнических систем с параметрами, обеспечивающими заданные показатели экономического и экологического эффектов [22; 23].

Выбранная стратегия освоения запасов золоторудного месторождения Рябиновое основывается на комплексном подходе, обеспечивающем безопасную и эффективную разработку месторождения за счет повышения уровня извлечения полезных компонентов и увеличения объемов товарной продукции, дифференцированного выбора способа переработки руд различного качества с обоснованием рациональной структуры производственных мощностей при минималь-

ном экологическом воздействии на окружающую среду.

Заключение

Вариативность стратегии отработки запасов золоторудного месторождения Рябиновое обусловлена неравномерностью распределения полезного компонента в массиве как по площади, так и по глубине месторождения. Неоднородность распределения содержания ценных компонентов вызвана длительной и неравномерной физико-химической изменчивостью среды в процессе генезиса полезных ископаемых.

Уточнены и обоснованы основные критерии открытой геотехнологии, обеспечивающие безопасную и эффективную разработку месторождения Рябиновое с достижением максимально возможного совокупного дисконтированного дохода при минимизации срока окупаемости проекта.

Показано, что достижение рациональной производственной мощности структурных подразделений горного предприятия по добыче и переработке золотосодержащих руд различного качества при комплексном освоении месторождения Рябиновое основано на оптимизации бортового и среднего содержания золота в руде и перерабатываемой различными способами рудной массы с обоснованием соотношения производственной мощности добычных и перерабатывающих циклов комбинированной геотехнологии.

Список литературы

1. Каплунов Д.Р. Развитие теоретической базы проектирования горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S1. С. 391–406.
2. Трубецкой К.Н. Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых. М.: ИПКОН РАН, 2014. 196 с.
3. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Комплексное освоение недр – основное содержание горных наук и образования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S1. С. 165–174.
4. Asad M.W.A., Qureshi M.A., Jang H. A review of cut-off grade policy models for open pit mining operations // Resources Policy. 2016. Vol. 49. Pp. 142–152.

5. Zayernyuk V.M., Mukhomorova I.V., Zabaikin Iu.V., Egorova E.N., Seifullayev B.M. Analysis of the current state and prospects of the gold mining industry in Russia // *Espacios*. 2017. Vol. 38. No. 58. P. 24.

6. Howe S., Pan J. Application of Enterprise Optimisation Considering Ultra High Intensity Blasting Strategies. Victoria: Whittle Consulting Ltd., 2018. 35 p.

7. Wellmer F.-W., Scholz R.W. What is the optimal and sustainable lifetime of a mine? // *Sustainability*. 2018. Vol. 10. Issue 2. Article 480. doi: 10.3390/su10020480.

8. Горно-обогатительный комплекс «Рябиновый»: проектная документация. СПб.: ЗАО «ТОМС инжиниринг», 2012. Т. 2.1. 98 с.

9. Resources and reserves audit of the Ryabinovoe gold deposit (Sakha Republic (Yakutia), Russia). United Kingdom: Micon International Co Limited, 2016.

10. Арсентьев А.И., Холодняков Г.А. Проектирование горных работ при открытой разработке месторождений. М.: Недра, 1994. 336 с.

11. Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю. Проектирование карьеров: учебное пособие для вузов. М.: НПК «Гемос Лимитед», 2002. 176 с.

12. Патент на изобретение РФ №2622534. Способ извлечения благородных металлов из отработанных штабелей кучного выщелачивания / Башлыкова Т.В., Рыжов С.В., Аширбаева Е.А., Грознов И.Н. Заявл. от 23.09.2015; опублик. 16.06.2017.

13. Рыжов С.В., Иляхин С.В., Сытенков В.Н., Никитин А.А. Повышение эффективности использования ресурсного потенциала рудных месторождений // *Горный журнал*. 2019. № 12. С. 25–29.

14. Грубецкой К.Н., Рыльникова М.В. Состояние и перспективы развития открытых горных работ в XXI веке // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № S1–1. С. 21–32.

15. Вареничев А.А., Комогорцев Б.В., Громова М.П. Сырьевая база золота России // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016. № 8. С. 212–220.

16. Абрамова М.А. Перспективы мирового потребления драгоценных металлов // *Горный информаци-*

онно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S52. С. 8–12.

17. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Методологические аспекты проектирования системы управления минерально-сырьевыми потоками в полном цикле комплексного освоения рудных месторождений // *Рациональное освоение недр*. 2016. № 2–3. С. 36–41.

18. Абдрахманов И.А., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Перспективы повышения полноты и комплексности освоения месторождений // *Недропользование. XXI век*. 2009. № 3. С. 28–32.

19. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzheva O. Metal deposits combined development experience // *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. Vol. 7. No. 6. Pp. 591–594.

20. Arteaga F. The mining rate in open pit mine planning: a thesis submitted for the degree of Master of Philosophy. Queensland: The University of Queensland, 2014. 110 p.

21. Рыжов С.В., Рыльникова М.В. Обоснование структуры производственной мощности золотодобывающего предприятия на различных этапах развития открытых горных работ // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020. № 1. С. 458–470.

22. Hall B. Cut-off Grades and Optimizing the Strategic Mine Plan. Carlton, Victoria: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2014. 301 p.

23. Dushin A.V., Yurak V.V. Authors' approach to the total economic value: essentials, structure, evolution // *Eurasian Mining*. 2018. No. 1. Pp. 11–15. doi: 10.17580/em.2018.01.03.

Для цитирования

Рыжов С.В., Рыльникова М.В., Есина Е.Н. Особенности горно-геологических и горнотехнических условий освоения золоторудного месторождения Рябиновое // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2020. Т. 21. № 2. С. 113–122. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-113-122>

Geological and mining features of gold deposits development of Ryabinovoe gold deposit

Sergey V. Ryzhov^{a,b}, Marina V. Rylnikova^a, Ekaterina N. Esina^{a,c}

^aInstitute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
4 Kryukovskii Deadend, Moscow, 111020, Russian Federation

^bSeligdar, 13 Pyatnitskaya St, bldg 2, Moscow, 115035, Russian Federation

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

Article history:

Received: May 2, 2020

Revised: May 10, 2020

Accepted: May 11, 2020

Keywords:

Ryabinovoe gold deposit, comprehensive development, gold deposit, mining and geological conditions, mining technical conditions, efficiency, safety, open geotechnology, differentiated approach

Abstract. The significant role of the gold mining industry in the development of the Russian mineral resource system determines the search for new organizational, technical and geotechnical solutions to improve the completeness and efficiency of deposit development. Most of Russia's gold deposits are in remote, sparsely populated areas, where there is a lack of energy, transport communications, and infrastructure. It is shown that the Ryabinovoe gold deposit, located in the Republic of Sakha (Yakutia), is characterized by a complex structure, relatively low occurrence of ore deposits and a widespread in the value of mineral raw materials. Features of the Ryabinovoe deposit consist in a complex structural structure and alternation of mineralized gold-bearing and low-gold-bearing or ore-free areas of various capacities and complex morphology. The main criteria for open Geotechnology have been clarified and justified. This ensures safe and efficient development of the Ryabinovoe field with the achievement of the maximum possible total discounted income and the shortest recoupment period for the project. In general, an integrated approach is the basis of the development strategy of the Ryabinovoe gold deposit. It includes increasing the level of extraction of useful components, increasing the production volume and a differentiated approach to the choice of a method for processing ores of different quality. It is shown that the achievement of rational production capacity in the complex development of the Ryabinovoe gold deposit is based on optimizing the variation of the onboard and average gold content with justification of the ratio of production capacity of the mining and processing cycle.

References

1. Kaplunov DR. Razvitie teoreticheskoy bazy proektirovaniya gornyh predpriyatij [Development of the theoretical basis for designing mining enterprises]. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;(S1):391–406. (In Russ.)

2. Trubetskoy KN. Razvitie resursosberegayushchih i resurovosproizvodyashchih geotekhnologij kompleksnogo osvoeniya mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh [Development of resource-saving and resource-reproducing geotechnologies of complex development of mineral deposits]. Moscow: IPKON RAS; 2014. (In Russ.)

3. Kaplunov DR, Radchenko DN. Kompleksnoe osvoenie nedr – osnovnoe sodержanie gornyh nauk i obrazovaniya [Complex development of mineral resources – the main content of mining science and education]. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2017;(S1):165–174. (In Russ.)

4. Asad MWA, Qureshi MA, Jang H. A review of cut-off grade policy models for open pit mining operations. *Resources Policy*. 2016;49:142–152.

Sergey V. Ryzhov, Chairman of the Board of Directors of Seligdar Holding; researcher of IPKON RAS.

Marina V. Rylnikova, Head of Department of Design Theory of Subsurface Development of IPKON RAS; Doctor of Technical Sciences, Professor; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9984-5980>, eLIBRARY SPIN-code: 9908-2312, Web of Science ResearcherID: E-4678-2014.

Ekaterina N. Esina, senior researcher of IPKON RAS; Associate Professor of Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering of Academy of Engineering of RUDN University; Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1685-2406>, eLIBRARY SPIN-code: 9090-9868, ResearcherID: E-6092-2017; esina-en@rudn.ru

5. Zayernyuk VM, Mukhomorova IV, Zabaikin IuV, Egorova EN, Seifullaev BM. Analysis of the current state and prospects of the gold mining industry in Russia. *Es-pacios*. 2017;38(58):24.
6. Howe S, Pan J. *Application of Enterprise Optimization Considering Ultra High Intensity Blasting Strategies*. Victoria: Whittle Consulting Ltd.; 2018.
7. Wellmer F-W, Scholz RW. What is the optimal and sustainable lifetime of a mine? *Sustainability*. 2018;10(2):480. doi: 10.3390/su10020480.
8. *Gorno-obogatitel'nyj kompleks "Ryabinovyj"* [Mining and processing complex "Ryabinovyj"]: project documentation (vol. 2.1). Saint Petersburg: TOMS engineering; 2012. (In Russ.)
9. *Resources and reserves audit of the Ryabinovoe gold deposit (Sakha Republic (Yakutia), Russia)*. United Kingdom: Micon International Co Limited; 2016.
10. Arsentiev AI, Kholodnyakov GA. *Proektirovanie gornyh rabot pri otkrytoj razrabotke mestorozhdenij* [Design of mining operations in open field development]. Moscow: Nedra Publ.; 1994. (In Russ.)
11. Anistratov YuI, Anistratov KYu. *Proektirovanie kar'erov* [Pit design]. Moscow: Gemos Limited; 2002. (In Russ.)
12. Bashlykova TV, Ryzhov SV, Ashirbaeva EA, Groznov IN. *Sposob izvlecheniya blagorodnyh metallov iz otrabotannyh shtabelej kuchnogo vyshchelachivaniya* [Method for extracting precious metals from spent piles of heap leaching]. Patent for invention of the Russian Federation No. 2622534. Statement of 23.09.2015. Publ. 16.06.2017. (In Russ.)
13. Ryzhov SV, Ilyakhin SV, Sytenkov VN, Nikitin AA. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya resursnogo potenciala rudnyh mestorozhdenij [Enhancing efficient utilization of resource potential of ore deposits]. *Mining Journal*. 2019;(12):25–29. (In Russ.)
14. Trubetskoy KN, Rylnikova MV. Sostoyanie i perspektivy razvitiya otkrytyh gornyh rabot v XXI veke [Situation and prospects of development of open-pit mining operations in the XXI century]. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;(S1–1):21–32. (In Russ.)
15. Varenichev AA, Komogortsev BV, Gromov MP. Syr'evaya baza zolota Rossii [The raw material base of gold in Russia]. *Mining information-analytical bulletin*. 2016;(8):212–220. (In Russ.)
16. Abramova MA. Perspektivy mirovogo potrebleniya dragocennyh metallov [Prospects of world consumption of precious metals]. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2018;(S52): 8–12. (In Russ.)
17. Rylnikova MV, Radchenko DN. Metodologicheskie aspekty proektirovaniya sistemy upravleniya mineral'no-syr'evymi potokami v polnom cikle kompleksnogo osvoeniya rudnyh mestorozhdenij [Methodological aspects of designing the management system of mineral resource flows in the full cycle of complex development of ore deposits]. *Rational development of the subsoil*. 2016;(2–3):36–41. (In Russ.)
18. Abdrakhmanov IA, Kaplunov DR, Rylnikova MV, Radchenko DN. Perspektivy povysheniya polnoty i kompleksnosti osvoeniya mestorozhdenij [Prospects for improving the completeness and complexity of field development]. *Subsoil use. 21st century*. 2009;(3):28–32. (In Russ.)
19. Golik V, Komashchenko V, Morkun V, Burdzheva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;7(6):591–594.
20. Arteaga F. *The mining rate in open pit mine planning* (a thesis submitted for the degree of Master of Philosophy). Queensland: The University of Queensland; 2014. (In Russ.)
21. Ryzhov SV, Rylnikova MV. Obosnovanie struktury proizvodstvennoj moshchnosti zolotodobyvayushchego predpriyatiya na razlichnyh etapah razvitiya otkrytyh gornyh rabot [Justification of the production structure capacity of the gold mining enterprise at various stages of open pit mining development]. *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2020;(1):458–470. (In Russ.)
22. Hall B. *Cut-off Grades and Optimising the Strategic Mine Plan*. Carlton, Victoria: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy; 2014.
23. Dushin AV, Yurak VV. Authors' approach to the total economic value: essentials, structure, evolution. *Eurasian Mining*. 2018;(1):11–15. doi: 10.17580/em.2018.01.03.

For citation

Ryzhov SV, Rylnikova MV, Esina EN Geological and mining features of gold deposits development of Ryabinovoe gold deposit. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(2):113–122. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-113-122>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-2-123-130

УДК 550.837

Научная статья

Некоторые особенности поляризации структуры электромагнитного поля на высоких частотах в геологических разрезах: математические решения и эксперименты

В.Ю. Абрамов

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 9 апреля 2020 г.

Доработана: 16 июля 2020 г.

Принята к публикации: 20 июля 2020 г.

Ключевые слова:

электромагнитное поле, вызванная поляризация, высокие частоты, аналитические решения, численные решения

Аннотация. Исследованы некоторые эффекты вызванной поляризации (ВП) в рудных телах и вмещающих породах при частотах выше 1 000 000 Гц. Инструментально изучены фазы реакции комплекса сопротивлений аппаратурой системы «Геозонд». Надежность высокочастотных ВП-измерений была подтверждена независимыми заверочными горными работами. Полученные результаты подтверждают наличие ВП-эффектов в рудных телах и вмещающих породах и предполагают необходимость их учета в интерпретации электромагнитных данных, в частности в данных индукционного каротажа. Целью математического компьютерного моделирования в настоящей работе было изучение распространения высокочастотного электромагнитного поля от линейного источника тока в материальной среде путем решения уравнений Максвелла методом конечно-разностных приближений (итераций) во временной области. Обработка результатов измерений велась по известной схеме – методом итеративного подбора в автоматическом режиме, что позволяет использовать указанный метод для сквозного расчета электромагнитных полей в сложнопостроенных трехмерно неоднородных структурах.

Введение

Математическое компьютерное моделирование структуры электромагнитного поля не потеряло своей актуальности, несмотря на большое количество работ в данной области. Причиной этого является разнообразие физических сочетаний состояния вещества горных пород в реальных геологических обстановках и необходимость поиска твердых полезных ископаемых новых гео-

лого-промышленных типов. Сочетания петрофизических свойств горных пород создают среды самых различных форм и особенностей – нелинейные, анизотропные, неоднородные, слоистые, складчатые и прочие.

Целью математического компьютерного моделирования в настоящей работе было изучение распространения высокочастотного электромагнитного поля от линейного источника тока в материальной среде путем решения уравнений Максвелла методом конечно-разностных приближений (итераций) во временной области. Подобные модельные исследования ранее проводились различными авторами [1–9]. Отличие данной работы от перечисленных выше в попытке решить обозначенную проблему для высокочастотного электро-

Абрамов Владимир Юрьевич, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН; кандидат геолого-минералогических наук; geophy-rudn@mail.ru

© Абрамов В.Ю., 2020



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

магнитного поля с изучением эффектов вызванной поляризации. В таком решении видится возможность практического применения этой работы при поисках рудных месторождений (как коренных, так и россыпных).

Результаты исследования

Строгое решение системы уравнений Максвелла в общем виде пока неизвестно. Исключения составляют несколько специальных случаев. Преодолению проблемы препятствует удовлетворение решения граничным условиям. Однако решение задач электродинамики сейчас интенсифицируется [10–16].

Чаще всего при решениях нестационарных уравнений Максвелла применяется конечно-разностный метод во временной области (К-Р ВО). Этот метод был дан в работе Kane S. Yee в 1966 г. [17]. Решая задачу о рассеянии электромагнитного импульса на проводящей поверхности, он предложил перемежать компоненты поля в трехмерной матрице пространства так, чтобы электрические компоненты поля (E) располагались в середине ребер матрицы, а магнитные компоненты поля (H) располагались в серединах граней этой матрицы (рис. 1 и 2). Это позволяет иметь систему конечно-разностных уравнений, во многом удовлетворяющую граничным условиям, включающим проводящие и полупроводящие поверхности.

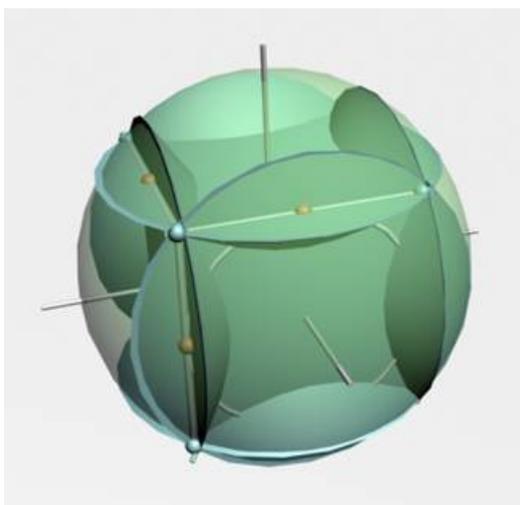


Рис. 1. Расположение составляющих электромагнитного поля (E и H) в элементарной ячейке трехмерной матрицы расчетной области
 [Figure 1. Location of the components of the electromagnetic field (E and H) in the unit cell of the three-dimensional matrix of the calculated area]

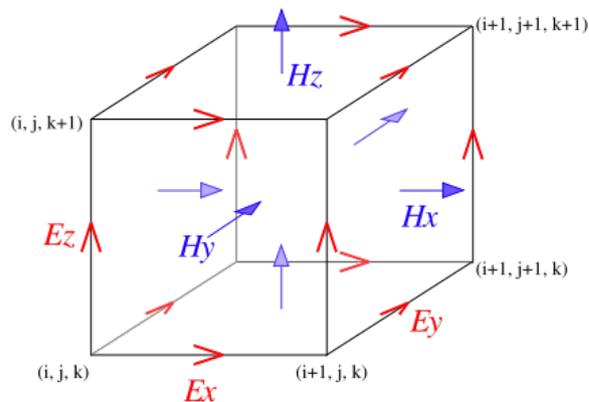
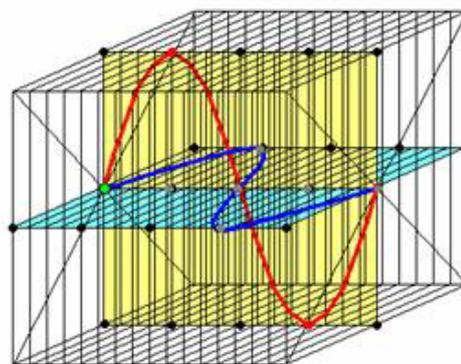
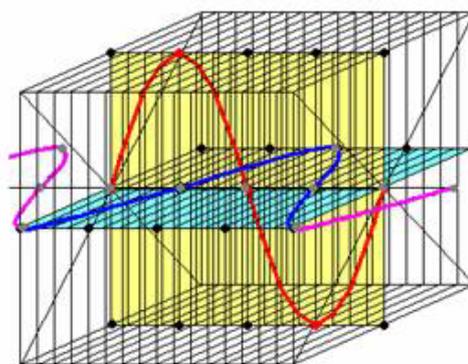


Рис. 2. Направления векторов электромагнитного поля (E и H) относительно элементарной ячейки трехмерной матрицы расчетной области
 [Figure 2. Directions of the electromagnetic field vectors (E and H) relative to the unit cell of the three-dimensional matrix of the calculated area]



Поперечная электромагнитная волна
 [Secondary electromagnetic wave]



Продольная электромагнитная волна
 [Primary electromagnetic wave]

Рис. 3. Распределение векторов и величин амплитуд электрических (красная линия графиков) и магнитных (синяя линия графиков) составляющих переменного электромагнитного поля в продольной и поперечной электромагнитных волнах [18]
 [Figure 3. Distribution of vectors and amplitudes of electric (red line of graphs) and magnetic (blue line of graphs) components of the alternating electromagnetic field in the primary and the secondary electromagnetic waves [18]]

В представленной на рис. 3 модели автоматически удовлетворяются граничные условия и для поверхностей раздела сред (благодаря смене положения в пространстве электрической и магнитной составляющих поля). Это позволяет использовать данный метод для сквозного расчета электромагнитных полей в сложнопостроенных трехмерно неоднородных структурах. В этой модели каждая компонента вектора магнитного поля находится между четырьмя компонентами электрического поля, и наоборот. Такое положение компонент полей дает возможность реализовать и центрально-разностный аналог пространственных производных вихревых уравнений Максвелла, и естественную геометрию воспроизведения интегрального вида закона Фарадея в простой пространственной ячейке.

Трехмерные конечно-разностные уравнения во временной области для прямоугольной системы координат записывают так, как показано ниже.

Уравнения Максвелла:

$$\mu \partial_t H_x + \sigma^* H_x = -(\partial_y E_z - \partial_z E_y) - K_x;$$

$$\mu \partial_t H_y + \sigma^* H_y = -(\partial_z E_x - \partial_x E_z) - K_y;$$

$$\mu \partial_t H_z + \sigma^* H_z = -(\partial_x E_y - \partial_y E_x) - K_z;$$

$$\varepsilon \partial_t E_x + \sigma E_x = (\partial_y H_z - \partial_z H_y) - J_x;$$

$$\varepsilon \partial_t E_y + \sigma E_y = (\partial_z H_x - \partial_x H_z) - J_y;$$

$$\varepsilon \partial_t E_z + \sigma E_z = (\partial_x H_y - \partial_y H_x) - J_z.$$

Расположение компонент поля:

$$H_x^n(i, j, k) = H_x(x_{i+1/2}, y_{j+1/2}, z_{k+1/2}, n\Delta t);$$

$$i = 1, \dots, N_x + 1, j = 1, \dots, N_y, k = 1, \dots, N_z,$$

$$H_y^n(i, j, k) = H_y(x_{i+1/2}, y_j, z_{k+1/2}, n\Delta t);$$

$$i = 1, \dots, N_x + 1, j = 1, \dots, N_y, k = 1, \dots, N_z;$$

$$H_z^n(i, j, k) = H_z(x_{i+1/2}, y_{j+1/2}, z_k, n\Delta t);$$

$$i = 1, \dots, N_x + 1, j = 1, \dots, N_y, k = 1, \dots, N_z,$$

$$E_x^n(i, j, k) = E_x(x_{i+1/2}, y_j, z_k, (n+1/2)\Delta t);$$

$$i = 1, \dots, N_x, j = 1, \dots, N_y + 1, k = 1, \dots, N_z + 1;$$

$$E_y^n(i, j, k) = E_y(x_i, y_{j+1/2}, z_k, (n+1/2)\Delta t);$$

$$i = 1, \dots, N_x + 1, j = 1, \dots, N_y, k = 1, \dots, N_z + 1;$$

$$E_z^n(i, j, k) = E_z(x_i, y_{j+1/2}, z_{k+1/2}, (n+1/2)\Delta t);$$

$$i = 1, \dots, N_x + 1, j = 1, \dots, N_y + 1, k = 1, \dots, N_z.$$

Конечно-разностные уравнения:

$$H_x^n(i, j, k) = -\beta_m K_x^{n-1} - \beta_m \left\{ \frac{E_z^{n-1}(i, j+1, k) - E_z^{n-1}(i, j, k)}{y_{j+1} - y_j} \right\} +$$

$$+\beta_m \left\{ \frac{E_y^{n-1}(i, j, k+1) - E_y^{n-1}(i, j, k)}{z_{k+1} - z_k} \right\} +$$

$$+\alpha_m H_x^{n-1}(i, j, k);$$

$$H_y^n(i, j, k) = -\beta_m K_y^{n-1} -$$

$$-\beta_m \left\{ \frac{E_x^{n-1}(i, j, k+1) - E_x^{n-1}(i, j, k)}{z_{k+1} - z_k} \right\} +$$

$$+\beta_m \left\{ \frac{E_z^{n-1}(i+1, j, k) - E_z^{n-1}(i, j, k)}{x_{i+1} - x_i} \right\} +$$

$$+\alpha_m H_y^{n-1}(i, j, k);$$

$$H_z^n(i, j, k) = -\beta_m K_z^{n-1} -$$

$$-\beta_m \left\{ \frac{E_y^{n-1}(i+1, j, k) - E_y^{n-1}(i, j, k)}{x_{i+1} - x_i} \right\} -$$

$$+\beta_m \left\{ \frac{E_x^{n-1}(i, j+1, k) - E_x^{n-1}(i, j, k)}{y_{j+1} - y_j} \right\} +$$

$$+\alpha_m H_z^{n-1}(i, j, k);$$

$$E_x^m(i, j, k) = -\beta_e J_x^{n-1} +$$

$$+\beta_e \left\{ \frac{H_z^{n-1}(i, j, k) - H_z^{n-1}(i, j-1, k)}{y_{j+1/2} - y_{j-1/2}} \right\} +$$

$$+\beta_e \left\{ \frac{H_y^{n-1}(i, j, k) - H_y^{n-1}(i, j, k-1)}{z_{k+1/2} - z_{k-1/2}} \right\} +$$

$$+\alpha_m E_x^{n-1}(i, j, k);$$

$$E_y^n(i, j, k) = -\beta_e J_y^{n-1} +$$

$$+\beta_e \left\{ \frac{H_x^{n-1}(i, j, k) - H_x^{n-1}(i, j, k-1)}{z_{k+1/2} - z_{k-1/2}} \right\} -$$

$$-\beta_e \left\{ \frac{H_z^{n-1}(i, j, k) - H_z^{n-1}(i-1, j, k)}{x_{i+1/2} - x_{i-1/2}} \right\} +$$

$$+\alpha_e E_y^{n-1}(i, j, k);$$

$$E_z^n(i, j, k) = -\beta_e J_z^{n-1} +$$

$$+\beta_e \left\{ \frac{H_y^{n-1}(i, j, k) - H_y^{n-1}(i-1, j, k)}{x_{i+1/2} - x_{i-1/2}} \right\} -$$

$$-\beta_e \left\{ \frac{H_x^{n-1}(i, j, k) - H_x^{n-1}(i, j-1, k)}{y_{j+1/2} - y_{j-1/2}} \right\} +$$

$$+\alpha_e E_z^{n-1}(i, j, k),$$

где $\alpha_m = \left(\frac{\mu}{\Delta t} - \frac{\sigma^*}{2} \right) / \left(\frac{\mu}{\Delta t} + \frac{\sigma^*}{2} \right),$

$$\beta_m = \left(\frac{\mu}{\Delta t} + \frac{\sigma^*}{2} \right)^{-1},$$

а $(K_x^{n-1}, K_y^{n-1}, K_z^{n-1})$ берутся в местах расположения H -компонент, и где

$$\alpha_e = \left(\frac{\varepsilon}{\Delta t} - \frac{\sigma}{2} \right) / \left(\frac{\varepsilon}{\Delta t} + \frac{\sigma}{2} \right),$$

$$\beta_m = \left(\frac{\varepsilon}{\Delta t} + \frac{\sigma}{2} \right)^{-1},$$

а $(J_x^{n-1}, J_y^{n-1}, J_z^{n-1})$ берутся в местах расположения E -компонент.

В свободном пространстве

$$\vec{J} = \vec{K} = 0, \quad \sigma = \sigma^* = 0,$$

$$\alpha_e = \alpha_m = 1, \quad \beta_e = \frac{\Delta t}{\varepsilon_0}, \quad \beta_m = \frac{\Delta t}{\mu_0}.$$

Электрические и магнитные составляющие поля вычисляются попеременно через полушаги во времени – сначала магнитная составляющая, затем электрическая. Следует отметить, что правильность вычислений сильно зависит от соотношения пространственной и временной детальности (дискретизации) трехмерных матриц с результатами моделирования. Для этого размеры ячеек трехмерных матриц необходимо выбирать кратными в 2, 3, 4 и более раз по отношению к размеру объекта, который необходимо выделить по результатам моделирования. Численное моделирование экспериментально-электромагнитного рассеяния волн на объектах сложной формы, выполненное в работе [11], показало, что время счета, то есть число полных периодов падающей синусоидальной волны, необходимое для установления синусоидального режима в расчетной области, зависит от размера объекта и его диэлектрической и магнитной однородности. Это условие позволяет рассматривать поведение электромагнитных волн в горных породах по аналогии с сейсмическими волнами (рис. 3). Такой подход дает возможность вычленивать и отфильтровать некоторые явления (ранее трактовавшиеся как помехи, внутренние шумы аппаратуры и пр.), возникающие при измерениях вызванной поляризации на высоких частотах от объектов сложной формы. Фильтрация ведется на основе анализа фазовых величин магнитных компонент электромагнитного поля (рис. 4). Из рис. 3 и 4 видно, что изменение амплитуды магнитной составляющей поля в продольной волне отстает от поперечной на четверть периода колебаний несущей частоты.

Дальнейшая обработка результатов измерений велась по известной схеме, методом итеративного подбора в автоматическом режиме. Обычно число итераций составляло не менее 10 и

не более 20 с поправочным коэффициентом 0,01–0,02. Большое число итераций или более высокая величина поправочного коэффициента не имеют смысла и часто приводят к искажению результата при визуализации (проверялось после заверочных буровых и горных работ).

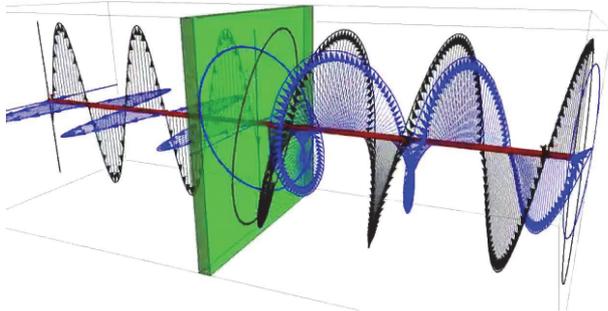


Рис. 4. Поляризация плоской электромагнитной волны [19]
[Figure 4. The polarization of a plane electromagnetic wave [19]]

Первые эксперименты по измерению эффектов вызванной поляризации электромагнитного поля на высоких частотах были начаты нами в 1995 г. на аппаратуре «Геозонд-РЧ». Недостатки аппаратуры (супергетеродинная схема приемни-

ка, узкий частотный спектр и пр.), не позволявшие в должной мере обеспечить чистоту эксперимента, привели к необходимости выбора новой аппаратурной схемы, ее реализации и отладки. Для визуализации результатов измерений сначала использовался цифровой осциллограф Visual DMM 740. Позже визуализация и запись результатов измерений производилась на виртуальный осциллограф Zetlab, устанавливаемый в ноутбук или планшет. Эксперименты проводились в полевых условиях на Южном Урале, в Монголии, Казахстане и Центральной России. Заверочные работы по проверке результатов геологической интерпретации полученных измерений выполнялись во всех случаях и показали хорошую сходимость с результатами экспериментов.

Заключение

Ограниченный размер статьи не позволяет привести результаты всех экспериментов. На рис. 5 представлен геофизический разрез, полученный на участке Дзун-Чулут в Монголии по одному из профилей через межгорную впадину.

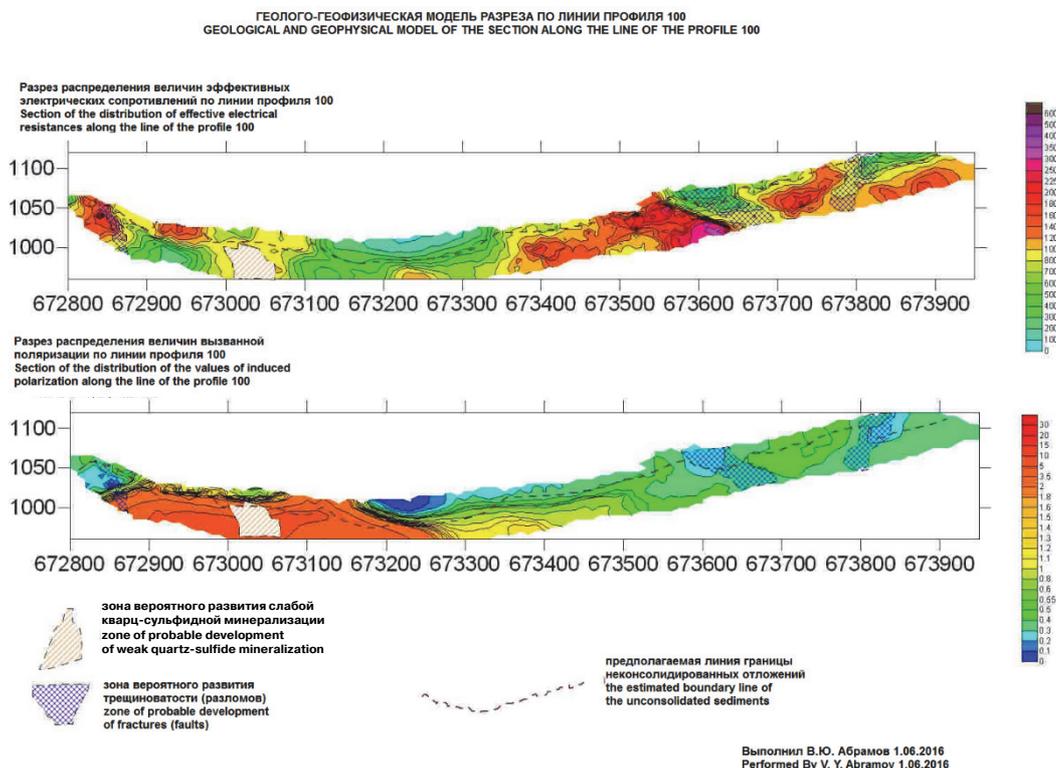


Рис. 5. Результаты измерения электрических сопротивлений в разрезе по бортам долины ручья Узун-Чулун
[Figure 5. Results of measuring electrical resistances in the section along the sides of the valley of the Uzun-Chulun stream]

Отчетливо выделяются участки пониженных электрических сопротивлений в долине, соответствующие обводненным породам в самой нижней части разреза. В бортах долины выделяются участки с повышенными сопротивлениями, соответствующие выходам магматических пород, и участки пониженных сопротивлений, соответствующие выходам углефицированных сланцев.

Список литературы

1. *Дмитриев В.И., Серебренников Н.Н.* Численный расчет электрического поля точечного источника в слоистой среде с осесимметричным включением // *Известия вузов. Геология и разведка*. 1987. № 2. С. 112–117.

2. *Иванов В.Т., Кризский В.Н.* Решение некоторых задач электроразведки методом граничных интегральных уравнений // *Известия вузов. Геология и разведка*. 1993. № 4. С. 112–117.

3. *Манаева Е.Н., Постников Е.Б.* Электромагнитные процессы вблизи фронта ступенчатого импульса при электромагнитном зондировании Земли в случае слабонеоднородной проводящей среды // *Известия вузов. Геология и разведка*. 2002. № 3. С. 104–108.

4. Математическое моделирование электромагнитных полей: материалы международного проекта COMMEMI. М.: Наука, 1992. 198 с.

5. *Пашкова Т.И., Постников Е.Б., Соболев С.В.* О взаимодействии электромагнитных импульсов ступенчатой и прямоугольной форм с поверхностью Земли // *Известия вузов. Геология и разведка*. 1999. № 5. С. 115–119.

6. *Редозубов А.А.* Об ориентировке полярных диаграмм η_k и ρ_k в анизотропной среде // *Известия вузов. Геология и разведка*. 1994. № 2. С. 119–122.

7. *Талалов А.Д.* Модель электрических свойств водонасыщенных горных пород для частотного диапазона 10^3 – 10^9 Гц // *Известия вузов. Геология и разведка*. 2003. № 1. С. 75–80.

8. *Талалов А.Д., Даев Д.С.* Лабораторные исследования частотой зависимости электрических свойств глинистых пород в диапазоне 20– 10^9 Гц // *Известия вузов. Геология и разведка*. 1997. № 6. С. 123–129.

9. *Burtman V., Endo M., Zhdanov M.S., Ingeman-Nielsen T.* High-frequency induced polarization measu-

rements of hydrocarbon-bearing rocks // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2011. Pp. 677–681. <https://doi.org/10.1190/1.3628168>

10. *Жданов М.С., Спичак В.В.* Математическое моделирование электромагнитных полей в трехмерно-неоднородных средах. М.: Наука, 1992. 188 с.

11. *Тафлав А., Умашанкар К.Р.* Численное моделирование рассеяния электромагнитных волн и вычисление эффективной площади отражения целей конечно-разностным методом во временной области // *ТИИЭР*. 1989. Т. 77. № 5. С. 57–76.

12. *Zhou Pei-bai.* Numerical analysis of electromagnetic fields. Berlin: Springer, 1993. 406 p.

13. *Binns K.J., Lawrenson P.J., Trowbridge C.W.* The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields. John Wiley & Sons, 1992. 486 p.

14. *Bootton R.C.* Computation methods for electromagnetic and microwaves. John Wiley & Sons, 1992. 192 p.

15. *Paul C.R.* Introduction to electromagnetic compatibility. John Wiley & Sons, 1992. 784 p.

6. *Сильвестр П., Феррари П.* Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. М.: Мир, 1986. 229 с.

17. *Yee K.S.* Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotopic media // *IEEE Trans. and Antennas and Prop.* 1966. Vol. AP-14. No. 3. Pp. 302–307.

18. *Кроуфорд Ф.* Волны: учебное руководство. 3-е изд., испр. М.: Наука, 1984. (Берклеевский курс физики. Т. 3).

19. *Селунский А.Б., Кузьмин А.В., Комарова Н.Ю.* Тепловое поглощение плоской электромагнитной волны произвольной поляризации на синусоидальной границе водной поверхности. М.: ИКИ РАН, 2013.

Для цитирования

Абрамов В.Ю. Некоторые особенности поляризации структуры электромагнитного поля на высоких частотах в геологических разрезах: математические решения и эксперименты // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2020. Т. 21. № 2. С. 123–130. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-123-130>

Some peculiarities of the polarization structure of the electromagnetic field at high frequencies in geological sections: mathematical solutions and experiments

Vladimir Yu. Abramov

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

Article history:

Received: April 9, 2020

Revised: July 16, 2020

Accepted: July 20, 2020

Keywords:

electromagnetic pole, induced polarization, high frequency, analytical solution, numerical solution

Abstract. The effects of induced polarization (IP) in the ore bodies and host rocks in the frequencies above 1 000 000 Hz were considered. The phase response of the complex resistivity (CR) system equipment "Geozond" have been explored instrumentally. The reliability of high-frequency IP measurements was confirmed by independent verification by mining activities. The results confirm the presence of IP effects in the ore bodies and host rocks. They suggest the necessity to account for IP effects in the interpretation of electromagnetic data, in particular, in induction logging data. The purpose of mathematical computer modeling in this work was to study the propagation of a high frequency electromagnetic field from a linear current source in a material medium by solving Maxwell's equations using finite-difference approximations (iterations) in the time domain. The measurement results were processed according to a well-known scheme, using the method of iterative selection in automatic mode. This allows to use this method for end-to-end calculation of electromagnetic fields in complex three-dimensional inhomogeneous structures.

References

1. Dmitriev V, Serebrennikov N. Numerical calculation of the electric field of a point source in a layered medium with axisymmetric inclusion. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 1987;(2):112–117. (In Russ.)

2. Ivanov VT, Krizsky VN. Solution of some problems of electrical exploration by the method of boundary integral equations. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 1993;(4):112–117. (In Russ.)

3. Manaeva EN, Postnikov EB. Electromagnetic processes near the front of a step pulse in the case of electromagnetic sounding of the Earth in the case of a weakly homogeneous conducting medium. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 2002;(3):104–108. (In Russ.)

4. *Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh polei: materialy mezhdunarodnogo proekta COMMEMI [Mathematical modeling of electromagnetic fields: materials of the international project COMMEMI].* Moscow: Nauka Publ.; 1992. (In Russ.)

5. Pashkova TI, Postnikov EB, Sobolev SV. On the interaction of electromagnetic pulses of stepped and rectangular forms with the Earth's surface. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 1999;(5):115–119. (In Russ.)

6. Redozubov AA. On the orientation of polar diagrams NK and PK in an anisotropic medium. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 1994;(2):119–122. (In Russ.)

7. Talalov AD. Model of electrical properties of water-saturated rocks for the frequency range of 10^3 – 10^9 Hz. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 2003;(1):75–80. (In Russ.)

8. Talalov AD, Dayev DS. Laboratory studies of the frequency dependence of the electrical properties of clay rocks in the range of 20– 10^9 Hz. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration.* 1997;(6):123–129. (In Russ.)

9. Burtman V, Endo M, Zhdanov MS, Ingeman-Nielsen T. High-frequency induced polarization measurements of hydrocarbon-bearing rocks. *SEG Technical*

Vladimir Yu. Abramov, Associate Professor of Department of Geology, Mining and Oil & Gas Engineering of RUDN University; Candidate of Geological Sciences; geophy-rudn@mail.ru

Program Expanded Abstracts. 2011:677–681. <https://doi.org/10.1190/1.3628168>

10. Zhdanov MS, Spichak VV. *Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh polei v trekhmernoneodnorodnykh sredakh* [Mathematical modeling of electromagnetic fields in three-dimensional inhomogeneous media]. Moscow: Nauka Publ.; 1992. (In Russ.)

11. Taflav A, Umashankar KR. Numerical simulation of electromagnetic wave scattering calculation of the effective area of reflection of targets by the finite-difference method in the time domain. *TIHER*. 1989;77(5):57–76. (In Russ.)

12. Zhou Pei-bai. *Numerical analysis of electromagnetic fields*. Berlin: Springer; 1993.

13. Binns KJ, Lawrenson PJ, Trowbridge CW. *The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields*. John Wiley & Sons; 1992.

14. Booton RC. *Computation methods for electromagnetic and microwaves*. John Wiley & Sons; 1992.

15. Paul CR. *Introduction to electromagnetic compatibility*. John Wiley & Sons; 1992.

16. Sylvester P, Ferrari R. *Metod konechnykh elementov dlya radioinzhenеров i inzhenerov-elektrikov* [Finite

element method for radio engineers and electrical engineers]. Moscow: Mir Publ.; 1986. (In Russ.)

17. Yee KS. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. and Antennas and Prop.* 1966; AP-14(3):302–307.

18. Crawford F. *Volny* [Waves]. 3rd ed. Moscow: Nauka Publ.; 1984.

19. Selunsky AB, Kuzmin AV, Komarova NYu. *Teplovoe pogloshchenie ploskoi elektromagnitnoi volny proizvol'noi polyarizatsii na sinusoidal'noi granitse vodnoi poverkhnosti* [Thermal absorption of a plane electromagnetic wave of arbitrary polarization at the sinusoidal boundary of the water surface]. Moscow: IKI RAS Publ.; 2013. (In Russ.)

For citation

Abramov VYu. Some peculiarities of the polarization structure of the electromagnetic field at high frequencies in geological sections: mathematical solutions and experiments. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(2): 123–130. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-123-130>



СТРОИТЕЛЬСТВО CIVIL ENGINEERING (CONSTRUCTION)

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-2-131-135

УДК 72

Научная статья

«Ренессанс» интеллектуального капитала, отображаемый в нетрадиционных (инновационных) приемах формирования архитектурных систем

А.А. Плешивцев^а, В.В. Галишникова^б

^аГосударственный университет по землеустройству, Российская Федерация, 105064, Москва, ул. Казакова, д. 15

^бРоссийский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

История статьи:

Поступила в редакцию: 14 апреля 2020 г.

Доработана: 13 июля 2020 г.

Принята к публикации: 16 июля 2020 г.

Ключевые слова:

интеллектуальный капитал, архитектурные системы, архитектурная теория, строительный опыт, технологические приемы, инновационные технологии, нетрадиционные решения, приемы и методы композиции

Аннотация. Проведены исследования, установившие основные особенности современного состояния и перспективы развития интеллектуального ресурса (капитала), который способен привести к формированию нового уровня качественных и количественных показателей традиционных и нетрадиционных архитектурных систем. Рассмотрены понятийный аппарат феномена «ренессанса» интеллектуального капитала как современной формы развития нематериальных активов и способа имплементации инновационных технологий (из различных областей знания) в процесс архитектурного творчества, а также особенности состояния и развития интеллектуального капитала для решения архитектурных задач и строительной практики прошедших исторических эпох. Разработан алгоритм решения нестандартных задач архитектурного творчества (нетрадиционной, проблемной ситуации) с привлечением интеллектуального ресурса. Установлено, что именно интеллектуальный ресурс лежит в основе исследовательской и практической инновационной деятельности, которая осуществляется в конкретном контексте формирования нетрадиционных архитектурных систем, способах и методах обеспечения уровня их технологичности (проектирования, изготовления, транспортировки, возведения, эксплуатации). Наличие интеллектуального ресурса является ключевым фактором обеспечения необходимых конкурентных преимуществ перед традиционными архитектурными системами и способами их организации в архитектурные объекты.

Введение

Несмотря на интуитивно понятное представление смысла термина «интеллектуальный капитал», в различных исследованиях существует не-

сколько несовпадающих трактовок его содержательных особенностей (например, в исторической ретроспективе архитектурного творчества или генезисе технологических возможностей строительного производства) [1–4].

Рассматриваемый феномен явления (представленный в формате «ренессанса» своих традиционных и перспектив реализации новых возможностей) характеризуется фактами присутствия современных видов интеллектуального капитала в различных прикладных проектах, форматах и областях творчества, науки и техники.

Плешивцев Александр Александрович, доцент кафедры основ архитектуры; кандидат технических наук, perspektiva-aa@mail.ru

Галишникова Вера Владимировна, директор департамента строительства Инженерной академии РУДН; доктор технических наук, профессор; ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-2493-7255>, e-LIBRARY SPIN-код: 2765-7069.

© Плешивцев А.А., Галишникова В.В., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

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

Современный тип интеллектуального капитала представляет собой значительно более сложное явление жизнедеятельности в сравнении с прошедшими историческими эпохами, а его практическое (технологическое) приложение и теоретическая (научная) роль неоднозначны и в значительной степени определяются конъюнктурой конкретной ситуации [5–7].

Исторические навыки и знания (как значительная составляющая интеллектуального капитала) способствуют формированию нетрадиционных архитектурных систем и практическому применению инновационных технологий (конструктивных элементов, материалов, технологических приемов) в ситуациях, для которых предыдущий опыт (или репродуктивная деятельность архитектурного творчества) не нашел адекватного решения или не рассматривал саму возможность разработки и реализации такого решения.

Состояние архитектурной науки к моменту завершения индустриальной эпохи характеризуется острым кризисом стиля «модернизм», который вполне логично трансформировался в архитектурный стиль «постмодернизм», «...начавший переоценку отношений между современной архитектурой и историческим прошлым» [8–10].

Кризисные тенденции развития постиндустриального общества сформировали необходимые условия для исследований и моделирования возможных направлений последующего развития различных сфер и областей жизнедеятельности, а также оценку возможных результатов и последствий становления информационной цивилизации. Значительное количество архитектурных образов прошедшей эпохи нашли свое отображение в форматах архитектурных систем, созданных в контексте эволюционного развития разнообразных технологических идей и возможностей по их практической реализации [11–13].

Доступ к источникам природных материалов (в сочетании с определенным состоянием природно-климатических условий и технологических возможностей) как решающее конкурентное преимущество формирования и развития традиционных видов архитектурных систем ушедшего индустриального периода цивилизационного состояния уступает место новым тенденциям, связанным с творческой имплементацией знаний, технических и технологических возможно-

стей нетрадиционных приемов (инноваций) в строительное производство.

Постиндустриальная концепция развития производственных, социальных и общественных отношений наряду с материальными составляющими относит и человеческий (интеллектуальный) ресурс к потенциальным источникам роста и развития [14–16].

Интеллектуальные способности (человеческий капитал) позволяют получить инновационное (нетрадиционное) решение проблемной задачи не только за счет использования знаний, необходимых для ее выполнения в конкретной предметной области, но также и способности адаптироваться к поиску, ассимиляции и модификации опыта и навыков из относительно широкого диапазона смежных областей.

Способность интеллектуального капитала к интеграции разнообразных знаний, способствующих поиску и решению прикладной задачи, имеет такое же важное значение, как и накопленный уровень знаний и умений в основной, предметной области. В конечном итоге универсальный человеческий капитал делает доступными разнообразные приемы и методы для решения задач в прикладных областях архитектурного знания, а также формирует научно-технический (научно-технологический) потенциал для адаптивности в направлениях поиска, осмысления, интеграции и рекомбинации новых и традиционных знаний в инновационных технологиях [17; 18].

Результаты

На рис. 1 представлена структурная схема имплементации интеллектуального ресурса в процесс поиска решения для проблемной ситуации посредством разработки нетрадиционного решения.

Усложнение условий формирования современных и перспективных архитектурных объектов (в виде повышения стандартов функционального качества, индивидуальных требований к эксплуатационным параметрам, требований по эффективности взаимодействия строительной продукции с окружающим пространством) можно рассматривать как определенный фактор, стимулирующий развитие именно интеллектуального ресурса, способного отождествлять необходимое качество материального объекта с применением инновационных технологических приемов [19; 20].



Рис. Принципиальная схема этапов решения задачи (проблемной ситуации) с привлечением интеллектуального ресурса

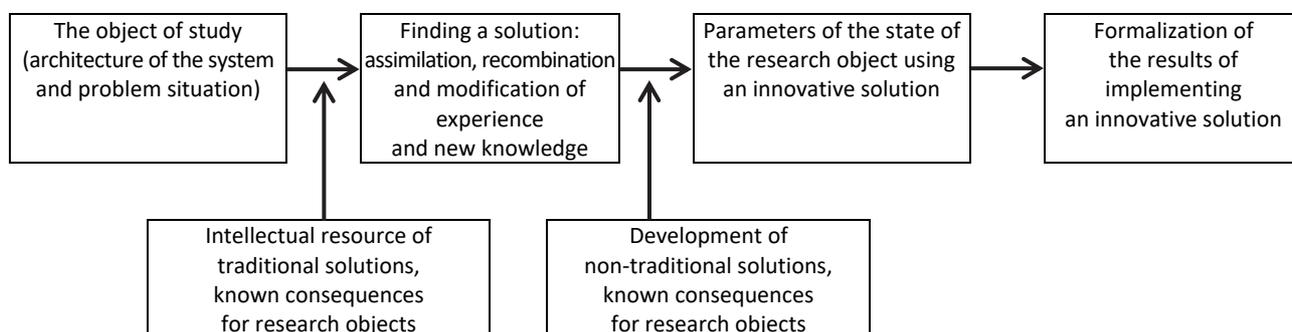


Figure. Schematic diagram of the stages of solving a problem (problem situation) with the involvement of an intellectual resource

Состояние архитектурной науки и строительного производства характеризуется вектором развития в направлении повышения роли интеллектуального капитала и возможностей интеллекта для формирования конкурентного уровня эффективности архитектурных систем и функционального качества строительной продукции.

Заключение

Проведенные исследования показали, что развитие интеллектуального ресурса формирует условия интеграции специфических, узкопрофессиональных методов и навыков для развития областей применения нетрадиционных архитектурных систем и технологических приемов.

Значение интеллектуального ресурса в области современного архитектурного знания состоит в постепенном отходе от непосредственного восстановления преемственности опыта (в рамках репродуктивной деятельности) и переходе к разработке механизмов и инструментов изменения традиционных принципов, навыков знания (в рамках продуктивной инновационной деятельности).

Интегральный характер архитектурных (композиционных) решений (как синтеза приемов прак-

тической деятельности и видов градостроительного, художественно-эстетического и технологического творчества) способствует привлечению инновационных (нетрадиционных) приемов технологичности, соответствующих современной парадигме «нелинейной логики» результатов архитектурного творчества.

Список литературы

1. Шангареев Р.Р., Метленков Н.Ф. Парадигмальные параметры архитектуры постиндустриального общества // Архитектура и строительство России. 2015. № 11–12. С. 17–22.
2. Балашова Е.Е., Суворов Н.В. Человеческий капитал как фактор социально-экономического развития России. СПб.: Нестор-История, 2016. 294 с.
3. Chow D., Lee E. International Intellectual Property, Problems, Cases, and Materials. St. Paul: West Academic Publishing, 2017. 965 p.
4. Lin C.Y.-Y., Edvinsson L. National Intellectual Capital. New York: Springer-Verlag, 2011. 392 p.
5. Brooking A. Intellectual Capital: Core Asset for the Third Millennium. London: Cengage Learning EMEA, 2010. 224 p.
6. Пермякова А.М. Интеллектуальный капитал как фактор инновационной деятельности российских компаний: дис. ... к. э. н. Екатеринбург. 2008. 145 с.

7. Coakes E., Bradburn A. What is the value of intellectual capital? // *Knowledge Management Research & Practice*. 2005. Vol. 3. Issue 2. Pp. 60–64.

8. Иконников А.В. Архитектура XX века. Утопии и реальность. Т. II. М.: Прогресс-Традиция, 2002. 672 с.

9. Hyde T. Architecture, Modernity, Crisis // *Journal of Architectural Education*. 2015. Vol. 69. Pp. 1–3.

10. Kulper C. Architecture, Crisis and Resuscitation: The Reproduction of Post-Fordism in Late-Twentieth-Century Architecture // *Architectural Theory Review*. 2011. Vol. 6. Issue 3. Pp. 312–314.

11. Schwartz Ch. *Introducing Architectural Tectonics: Exploring the Intersection of Design and Construction*. London: Routledge, 2016. 432 p.

12. Зайцев Г.Н., Федюкин В.К., Атрошенко С.А. История техники и технологий. М.: Политехника, 2007. 416 с.

13. Кокаревич М.Н. Архитектурное творчество в контексте культурно-исторической реальности // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 2 (49). С. 64–74.

14. Levi A. *Renaissance and Reformation: The Intellectual Genesis*. London: Yale University Press, 2004. 483 p.

15. Delgado-Verde M., Amores-Salvadó J., Martín-de Castro G., Navas-López J.E. Green intellectual capital and environmental product innovation: the mediating role

of green social capital // *Knowledge Management Research & Practice*. 2014. Vol. 12. Issue 3. Pp. 261–275.

16. Майдыров С.Г. От теории человеческого капитала к капиталу интеллектуальному // *Статистика, учет и аудит*. 2015. Т. 4. № 55. С. 60–67.

17. Фадеева Т.А. Развитие представлений об интеллектуальном капитале и его основные характеристики // *Символ науки*. 2016. № 3–1 (15). С. 208–211.

18. Васильева З.А. и др. Факторы, влияющие на инновационные технологии в строительстве // *Экономика и предпринимательство*. 2015. № 5–2 (58–2). С. 1058–1060.

19. Aksamija A. *Integrating Innovation in Architecture: Design, Methods and Technology for Progressive Practice and Research*. London: Academy Press, 2017. 264 p.

20. Engel H. *Tragsysteme*. Berlin: Hatje Cantz Verlag, 2009. 352 p.

Для цитирования

Плешивцев А.А., Галишникова В.В. «Ренессанс» интеллектуального капитала, отображаемый в нетрадиционных (инновационных) приемах формирования архитектурных систем // *Вестник Российского университета дружбы народов*. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 2. С. 131–135. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-131-135>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-2-131-135

Research article

“Renaissance” of intellectual capital, which is displayed in non-traditional (innovative) methods at forming in architectural systems

Aleksandr A. Pleshivtsev^a, Vera V. Galishnikova^b

^aState University of Land Management, 15 Kazakova St, Moscow, 105064, Russian Federation

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

Article history:

Received: April 14, 2020

Revised: July 13, 2020

Accepted: July 16, 2020

Keywords:

intellectual capital, architectural systems, architectural theory, construction experience, technological techniques, innovative technologies, innovative solutions, techniques and methods of composition

Abstract. The research has established the main features of the current state and prospects for the development of intellectual resources (capital), which can lead to the formation of a new level of qualitative and quantitative indicators of traditional and non-traditional architectural systems. The article presents the conceptual apparatus of the phenomenon of “Renaissance of intellectual capital” as a modern form of development of intangible assets and a way to implement innovative technologies (from various fields of knowledge) in the process of architectural creativity. The features of the state and development of intellectual capital for solving architectural problems and construction practices of past historical epochs are considered. An algorithm for solving non-standard problems of architectural creativity (non-traditional, problematic situations) with the involvement of an intellectual

Aleksandr A. Pleshivtsev, Associate Professor of Department of Fundamentals of Architecture; Candidate of Sciences (Techn.); perspektiva-aa@mail.ru
Vera V. Galishnikova, Director of Construction Department of Academy of Engineering of RUDN University; Doctor of Sciences (Techn.), Professor; ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0003-2493-7255>, e-LIBRARY SPIN-code: 2765-7069.

resource has been developed. It is established that the intellectual resource is the basis of research and practical innovation, which is carried out in the specific context of the formation of non-traditional architectural systems, methods and methods to ensure the level of their manufacturability (design, manufacture, transportation, construction, operation). The availability of intellectual resources is a key factor in providing the necessary competitive advantages over traditional architectural systems and ways to organize them into architectural objects.

References

1. Shangareyev RR, Metlenkov NF. Paradigmallye parametry arkhitektury postindustrial'nogo obshchestva [Paradigmatic parameters of the architecture of a post-industrial society]. *Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii [Architecture and Construction of Russia]*. 2015;(11–12): 17–22. (In Russ.)
2. Balashova YY, Suvorov NV. *Chelovecheskiy kapital kak faktor sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossii [Human capital as a factor in the socio-economic development of Russia]*. Saint Petersburg: Nestor-Istoriya Publ.; 2016. (In Russ.)
3. Chow D., Lee E. *International Intellectual Property, Problems, Cases, and Materials*. St. Paul: West Academic Publishing; 2017.
4. Lin CY-Y, Edvinsson L. *National Intellectual Capital*. New York: Springer-Verlag; 2011.
5. Brooking A. *Intellectual Capital: Core Asset for the Third Millennium*. London: Cengage Learning EMEA; 2010.
6. Permyakova AM. *Intellektual'nyy kapital kak faktor innovatsionnoy deyatel'nosti rossiyskikh kompaniy [Intellectual capital as a factor in the innovative activity of Russian companies]* (Dissertation of the Candidate of Economic Sciences). Yekaterinburg; 2008. (In Russ.)
7. Coakes E, Bradburn A. What is the value of intellectual capital? *Knowledge Management Research & Practice*. 2005;3(2):60–64.
8. Ikonnikov AV. *Arkhitektura XX veka. Utopii i real'nost' [XX century architecture. Utopia and reality]*. (vol. II). Moscow: Progress-Traditsiya Publ.; 2002. (In Russ.)
9. Hyde T. Architecture, Modernity, Crisis. *Journal of Architectural Education*. 2015;69:1–3.
10. Kulper C. Architecture, Crisis and Resuscitation: The Reproduction of Post-Fordism in Late-Twentieth-Century Architecture. *Architectural Theory Review*. 2011; 6(3):312–314.
11. Schwartz Ch. *Introducing Architectural Tectonics: Exploring the Intersection of Design and Construction*. London: Routledge; 2016.
12. Zaytsev GN, Feduykin VK, Atroshenko SA. *Istoriya tekhniki i tekhnologiy [History of engineering and technology]*. Moscow: Politehnika Publ.; 2007. (In Russ.)
13. Kokarevich MN. *Arkhitekturnoye tvorchestvo v kontekste kul'turno-istoricheskoy real'nosti [Architectural creativity in the context of cultural and historical reality]*. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering Bulletin]*. 2015;(2–49):64–74. (In Russ.)
14. Levi A. *Renaissance and Reformation: The Intellectual Genesis*. London: Yale University Press; 2004.
15. Delgado-Verde M, Amores-Salvadó J, Martín-de Castro G, Navas-López JE. Green intellectual capital and environmental product innovation: the mediating role of green social capital. *Knowledge Management Research & Practice*. 2014;12(3):261–275.
16. Maydyrov SG. Ot teorii chelovecheskogo kapitala k kapitalu intellektual'nomu [From the theory of human capital to intellectual capital]. *Statistika, uchet i audit [Statistics, Accounting and Auditing]*. 2015;4(55):60–67. (In Russ.)
17. Fadeyeva TA. Razvitiye predstavleniy ob intellektual'nom kapitale i yego osnovnyye kharakteristiki [The development of ideas about intellectual capital and its main characteristics]. *Simvol nauki [Symbol of science]*. 2016; (3–1(15)):208–211. (In Russ.)
18. Vasilyeva ZA, et al. Faktory, vliyayushchiye na innovatsionnyye tekhnologii v stroitel'stve [Factors affecting innovative technologies in construction]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo [Economics and Entrepreneurship]*. 2015;(5–2(58–2)):1058–1060. (In Russ.)
19. Aksamija A. *Integrating Innovation in Architecture: Design, Methods and Technology for Progressive Practice and Research*. London: Academy Press; 2017.
20. Engel H. *Tragsysteme*. Berlin: Hatje Cantz Verlag; 2009.

For citation

Pleshivtsev AA, Galishnikova VV. “Renaissance” of intellectual capital, which is displayed in non-traditional (innovative) methods at forming in architectural systems *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(2): 131–135. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-131-135>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-2-136-143

УДК 69.04

Научная статья

3D-моделирование геликоидов для использования в аддитивных технологиях

В. Жан Поль, Т.А. Эльбердов, М.И. Рынковская

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 14 апреля 2020 г.

Доработана: 2 июля 2020 г.

Принята к публикации: 6 июля 2020 г.

Ключевые слова:

3D-моделирование, геликоид, параметрическое моделирование, аддитивные технологии

Аннотация. В статье анализируются современные и доступные программные комплексы для построения моделей оболочек сложной геометрии и возможности их применения в 3D-моделировании. Анализ позволил выбрать программные комплексы, которые наиболее точно реализуют предлагаемый в статье метод 3D-моделирования с последующей печатью на 3D-принтере, подробно рассматриваемый на примере построения нескольких видов геликоидов. Процесс 3D-моделирования геликоида описан пошагово и подразделяется на несколько этапов: параметрическое моделирование геликоида в SCAD, редактирование полученной модели в AutoCAD и ее экспорт в специальный формат для 3D-печати. Использование метода параметрического моделирования обусловлено его точностью и бескомпромиссностью, с его помощью можно точно судить о виде и типе построенной поверхности. Параметрическое моделирование – это построение поверхности с помощью составления уравнений по каждой оси, то есть по осям x , y , z , для каждого вида и типа поверхности существуют свои характерные уравнения. Реализовать метод параметрического моделирования можно не во всех программных комплексах, что влечет определенного рода трудности. В статье также представлены возникающие в процессе 3D-моделирования геликоида сложности и предложены пути их решения.

Введение

Для печати трехмерной модели на 3D-принтере необходимо представить эту модель в файле формата .stl (от англ. stereolithography), широко используемого для хранения трехмерных моделей объектов, применяющихся в аддитивных тех-

нологиях [1]. Подавляющее большинство современных программ для построения трехмерной геометрии имеют возможность экспорта созданных в них моделей в формат stl.

Существует два варианта печати 3D-модели оболочки. Первый – самый простой – построить ее в любой программе, реализующей построение 3D-геометрии: специализированных SketchUp, Autodesk 3ds Max или более инженерных SolidWorks, AutoCAD и прочих, а затем экспортировать модель в файл формата stl [2]. Однако эти программы не реализуют построение поверхностей по математическим уравнениям, что затрудняет процесс построения оболочек сложной геометрии, особенно при предъявлении повышенных

Жан Поль Владимир, аспирант департамента строительства Инженерной академии; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6560-0021>; jeanpaulvladimir@yahoo.fr
Эльбердов Тимур Абуевич, магистрант департамента строительства Инженерной академии.

Рынковская Марина Игоревна, доцент департамента строительства Инженерной академии; кандидат технических наук, доцент; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2206-2563>, eLIBRARY SPIN-код: 9184-7432.

© Жан Поль В., Эльбердов Т., Рынковская М.И., 2020

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



требований к точности геометрии создаваемой модели. Второй вариант – построить модель оболочки в программе, имеющей возможность построения геометрии по математическим уравнениям, а затем перенести эту модель в файл формата stl. Среди программных комплексов, широко используемых в странах СНГ, только SCAD Office имеет функцию построения геометрии по математическим уравнениям. Также таким функционалом обладают программы COMSOL Multiphysics и ANSYS Workbench, однако они не имеют российской локализации и мало используются проектировщиками в странах СНГ. Цель данной работы состоит в том, чтобы определить возможные пути построения точной формы оболочки на основе параметрических уравнений поверхности сложной геометрии. В качестве тестового примера взята линейчатая винтовая поверхность – геликоид.

1. Программные комплексы для построения моделей оболочек сложной геометрии

Autodesk 3ds Max – профессиональное программное обеспечение для 3D-моделирования, анимации и визуализации при создании игр и проектировании. 3ds Max располагает обширными средствами для создания разнообразных по форме и сложности трехмерных компьютерных моделей, реальных или фантастических объектов окружающего мира с использованием разнообразных техник и механизмов [3]. 3ds Max широко используется архитекторами именно для создания сложных выразительных форм, которые трудно смоделировать в других программах. Разумеется, комплекс поддерживает экспорт модели в формат stl. Однако программа не имеет возможности построения геометрии по каким-либо математическим уравнениям.

SolidWorks – это система гибридного параметрического моделирования, которая предназначена для проектирования деталей и сборок в трехмерном пространстве [4; 5]. В SolidWorks можно одинаково удачно работать как с твердыми телами, так и с поверхностями. Как правило, деталь представляет собой твердое тело, поверхность либо сочетание твердого тела и набора поверхностей. Процесс построения 3D-модели основывается на создании элементарных геометрических примитивов и выполнении различных операций между ними [3]. Программный комплект чаще всего применяется в машиностроении, однако благодаря

широкому функционалу по построению трехмерной геометрии подходит и для моделирования оболочек, в нем предусмотрен экспорт модели в формате stl, но нет возможности построения геометрии модели по уравнениям.

Если речь идет о программах для 3D-моделирования, нельзя не упомянуть о всем известном AutoCAD. Это продукт фирмы Autodesk, являющийся универсальным базовым пакетом, содержащим практически все основы, которые заложены в специализированных пакетах систем автоматизированного проектирования (САПР) более высокого уровня. Широта возможностей, распространенность и открытость AutoCAD делают его предпочтительным программным продуктом для целей освоения технологии геометрического моделирования объектов [4]. Также программа поддерживает свой собственный язык программирования AutoLISP, который значительно расширяет базовые возможности AutoCAD не только в области автоматизации, но и при создании геометрии. Теоретически с его помощью можно реализовать построение линейчатых поверхностей, используя их первоначальный способ образования – перемещение прямой линии в пространстве по какому-либо закону, однако это требует знания самого языка программирования и определенных навыков в его использовании.

SCAD Office – программный комплекс, предназначенный для прочностного анализа строительных конструкций методом конечных элементов, а также их проектирования по существующим строительным нормам [10; 11]. Одно из главных преимуществ SCAD в рамках поставленной задачи – возможность построения не только простых оболочек вращения, но и оболочек сложной геометрии, при этом программа позволяет использовать как аналитический, так и параметрический способы задания поверхности. Однако программа не имеет функции экспорта построенных моделей в формат .stl.

COMSOL Multiphysics – это универсальная среда численного моделирования систем, устройств и процессов во всех областях проектирования, производства и научных исследований [5]. Базовый пакет COMSOL Multiphysics содержит инструменты геометрического моделирования для создания элементов геометрии на основе твердых тел, поверхностей, кривых и булевых операций [5]. В программе есть возможность построения поверхностей параметрическим способом задания, а также экспорта модели в формате .stl.

ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа, является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчетов. В состав программных продуктов ANSYS входят специализированные приложения для подготовки расчетных моделей, работы с геометрией и конечно-элементной сеткой, моделирования на системном уровне. Также программа поддерживает построение поверхностей по параметрическим уравнениям и экспорт модели в формате .stl.

Таким образом, с помощью программ Autodesk 3ds Max, SolidWorks и AutoCAD можно строить оболочки достаточно сложной геометрии и экспортировать их в формат .stl, но только если не требуется строить точную геометрию по математическим уравнениям. SCAD Office, COMSOL Multiphysics и ANSYS имеют возможность создания поверхностей по параметрическим уравнениям, но при этом и свои недостатки: из SCAD нельзя экспортировать геометрию в .stl файл, а программы COMSOL и ANSYS не имеют российской локализации и сравнительно мало используются проектировщиками в РФ.

В связи с широким распространением SCAD и наличием лицензии на этот программный комплекс в рамках данного исследования было решено проработать вопрос возможности построения параметрической модели в SCAD, перевода ее в формат .stl и распечатки модели с применением аддитивных технологий, а также рассмотреть возможные пути решения возникающих при этом проблем.

1. Построение модели с использованием SCAD Office

Для получения 3D-модели оболочки, заданной параметрическими уравнениями, наиболее простым представляется использование программного комплекса SCAD Office, который широко распространен в СНГ и, в отличие от других программ, обладающих нужным функционалом, имеет российскую локализацию. Однако и в этом случае неопытный пользователь при построении поверхности по параметрическим уравнениям может столкнуться с некоторыми нюансами, которые не освещены в инструкциях. И поскольку в SCAD не предусмотрен экспорт модели в формат .stl, то в качестве промежуточного этапа предлагается сначала экспортировать модель в программу, имеющую эту возможность и

распространенную на постсоветском пространстве – AutoCAD.

В качестве тестовых моделей было решено построить модели нескольких геликоидов, относящихся к разным типам [6; 7], а именно: прямой, косой, конволютный, развертывающийся и эллиптический, которые, имея на первый взгляд большое внешнее сходство, тем не менее обладают существенными отличиями в уравнениях. Параметрические уравнения рассматриваемых поверхностей, по которым в SCAD Office будут построены модели, представлены в таблице.

Таблица

Типы геликоидов и соответствующие им уравнения
[Table. The types of helicoid
and the equations corresponding to them]

Типы геликоида [Types of helicoid]	Параметрические уравнения задания поверхности [Surface parametric equations]
Прямой [Right]	$x(r, v) = r \times \cos(v),$ $y(r, v) = r \times \sin(v),$ $z(r, v) = c \times v$
Косой [Oblique]	$x(r, v) = r \times \cos(v),$ $y(r, v) = r \times \sin(v),$ $x(r, v) = c \times v + k \times r$
Конволютный [Convolute]	$x(r, v) = a \times \cos(v) - r \times \sin(\gamma) \times \sin(v),$ $y(r, v) = a \times \sin(v) + r \times \sin(\gamma) \times \cos(v),$ $x(r, v) = p \times v + r \times \cos(\gamma)$
Развертывающийся [Developable]	$x(r, v) = a \times \cos(v) - r \times \sin(\gamma) \times \sin(v),$ $y(r, v) = a \times \sin(v) + r \times \sin(\gamma) \times \cos(v),$ $x(r, v) = p \times v + r \times \cos(\gamma)$
Эллиптический [Elliptic]	$x(r, v) = a \times r \times \cos(v),$ $y(r, v) = a \times r \times \sin(v),$ $z(r, v) = c \times v$

Здесь параметры r и v для всех геликоидов приняты одинаковыми: $r \in [4; 12]$, $v \in [0; 6\pi]$, что соответствует геликоиду с внутренним радиусом 4 м, внешним радиусом 12 м, количество витков – 3. Постоянные коэффициенты c, k, a, γ, p приняты произвольно, чтобы визуальная разница между геометрией геликоидов была хорошо заметна [15].

Построение оболочек по параметрическим уравнениям в SCAD Office изложено в [8; 9], где подробно разобраны нюансы построения модели геликоида. Для данной задачи отличий почти нет, заметим лишь, что количество шагов табулирования переменной, содержащей угол поворота обрешетки вокруг оси (в данном случае перемен-

ной v), лучше устанавливать как можно большим, чтобы максимально аппроксимировать полученную фигуру к гладкой кривой. При этом SCAD, если устанавливать большое значение этого параметра, может ошибаться в построении, поэтому иногда лучше разбить фигуру на несколько частей и строить их отдельно, что позволит и уменьшить количество шагов табулирования. Количество шагов табулирования другой переменной (то есть r) необходимо, наоборот, установ-

ливать не слишком большим, так как это увеличит число узлов схемы, что отрицательно скажется при создании твердотельной геометрии в AutoCAD, а также значительно увеличит скорость обработки модели в нем. Так, при построении моделей количество шагов табулирования принято: $N_s = 90$ (для переменной v), $N_t = 8$ (для переменной r).

Модели построенных геликоидов представлены на рис. 1.

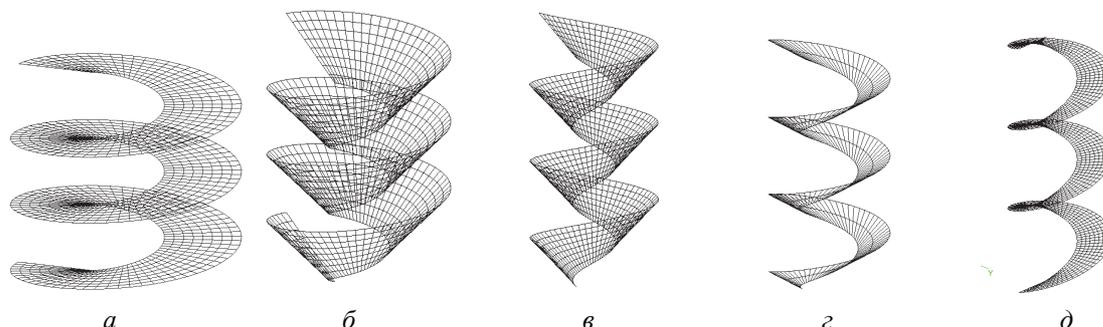


Рис. 1. Модели геликоидов в SCAD Office:
 а – прямой; б – косой; в – конволютный; г – развертывающийся; д – эллиптический
[Figure 1.] The models of helicoids at SCAD Office:
 a – right; б – oblique; в – convolute; г – developable; д – elliptic

Поскольку SCAD Office не позволяет экспортировать модели в файлы формата .stl, то далее необходимо воспользоваться промежуточным шагом – экспортировать модель в программу, которая имеет возможность экспорта в stl. Самый простой вариант для этого – программа Autocad. Для передачи модели в нее используем .dxf – универсальный формат, отвечающий за обмен информацией между разнообразными системами проектирования.

2. Редактирование модели в AutoCAD и экспорт в .stl

После импорта dxf-файла в AutoCAD попадает только плоская геометрия в виде отдельных 3D-граней. Такую модель, даже если преобразовать в stl-файл, невозможно будет напечатать на 3D-принтере. Необходимо преобразовать отдельные 3D-границы в один 3D-объект (рис. 2) [12–14].

Для этого необходимо сначала переключить рабочее пространство с «Рисования и аннотации» на «3D-моделирование», используя соответствующий пункт в нижнем правом меню AutoCAD. После переключения появляются специальные инструментальные панели для работы с 3D-геометрией.

Далее следует выделить все элементы модели и воспользоваться командой «Преобразовать в поверхность» на панели «Редактирование тела». В результате все элементы преобразуются из 3D-граней в поверхность. Это действие необходимо потому, что из элементов типа «3D-грань» невозможно получить 3D-объект в AutoCAD, а из «Поверхностей» можно.

Затем, снова выделив все элементы, нужно использовать команду «Толщина» для того, чтобы путем задания поверхности некоторой толщины получить 3D-объект [16]. AutoCAD предложит ввести значение, на которое будет увеличена толщина поверхности. В результате получается множество 3D-объектов заданной толщины. Для экспорта модели в файл .stl необходимо объединить их в один объект: для этого можно воспользоваться командой «Тело, объединение» на панели «Редактирование тела». AutoCAD попросит выбрать объекты, которые необходимо объединить, для чего требуется выбрать всю имеющуюся геометрию и нажать кнопку Enter. В результате получится один 3D-объект, который можно экспортировать в stl-файл. Модели геликоидов в AutoCAD, полученные после выполнения этих операций, представлены на рис. 3.

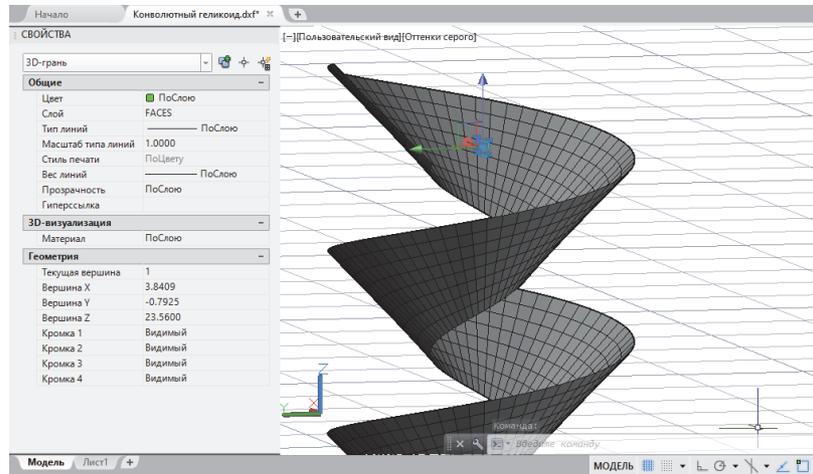


Рис. 2. Пример модели в AutoCAD сразу после импорта файла .dxf
[Figure 2. The model at AutoCAD immediately after import of the file .dxf

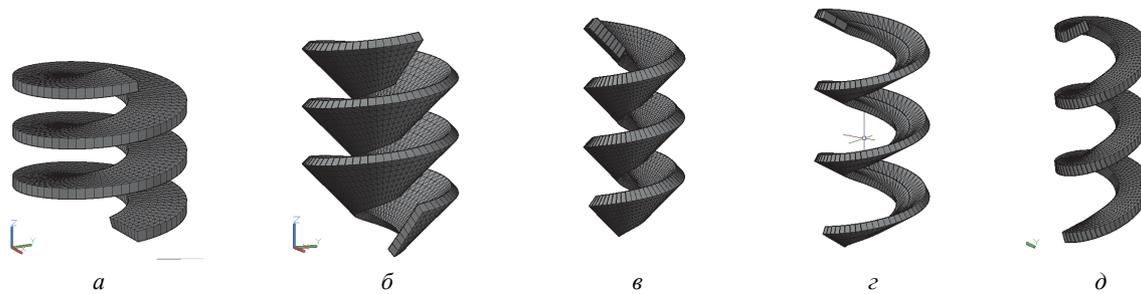


Рис. 3. Модели геликоидов в AutoCAD после обработки для экспорта в формат .stl:
 а – прямой; б – косой; в – конволютный; г – развертывающийся; д – эллиптический
[Figure 3. The models of helicoids at AutoCAD after processing for export at the format .stl:
 а – right; б – oblique; в – convolute; г – developable; д – elliptic]

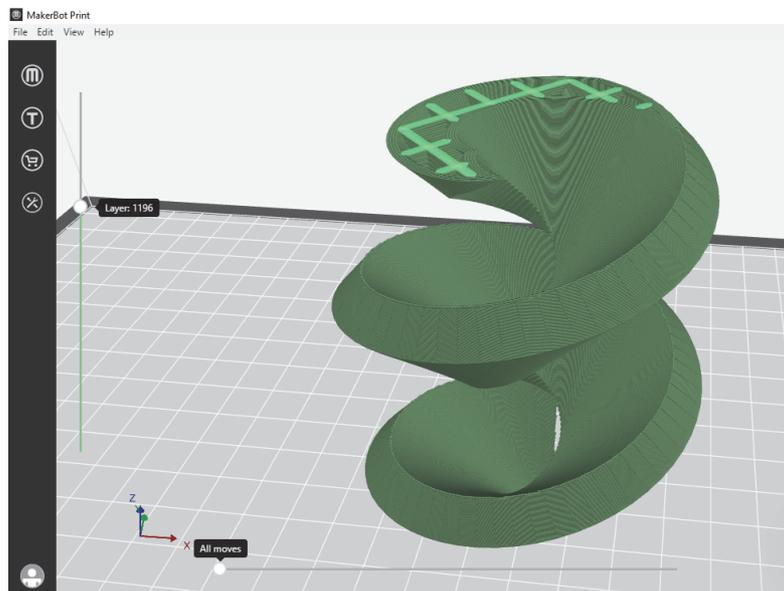


Рис. 4. Модель конволютного геликоида в превью печати на 3D-принтере
[Figure 4. The model of convolute helicoid at 3D printer preview]

Таким образом, после описанной выше обработки моделей остается только выбрать команду «Экспорт» в меню AutoCAD, в выпадающем меню – «Другие форматы», затем в открывшемся окне выбрать тип файла «Литография (*.stl)» и сохранить под нужным именем, не забыв выбрать объект для экспорта, когда AutoCAD попросит выбрать «тела или непроницаемые сети». Если в командной строке не появилось сообщение об ошибке – экспорт прошел успешно. Полученный файл можно открыть в любой программе, предназначенной для печати 3D-объектов, а затем и распечатать с применением аддитивных технологий.

В качестве примера на рис. 4 представлена превью 3D-печати на принтере модели конволютного геликоида в программе MakerBot Print.

Заключение

Рассмотренный в статье метод 3D-моделирования позволяет быстро и без особых затруднений выполнить поставленную задачу: создать на основе параметрических уравнений модель сложной геометрии и распечатать ее с применением аддитивных технологий. Метод подходит для любых оболочек и других архитектурных объектов, которые возможно построить в SCAD. Он может быть реализован в странах СНГ и является наиболее удобным для построения 3D-моделей, построенных с использованием параметрического моделирования, поскольку программы, упомянутые в статье и необходимые для реализации метода, являются широкоиспользуемыми, эргономичными и доступными для пользователей.

Список литературы

1. STL (формат файла) // Википедия – свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/STL_\(формат_файла\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/STL_(формат_файла)) (дата обращения: 25.03.2020).
2. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике (+ DVD-ROM). М.: БХВ-Петербург, 2013. 669 с.
3. Autodesk 3ds Max // Википедия – свободная энциклопедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_Max (дата обращения: 25.03.2020).
4. Аведьян А. SolidWorks – стандарт трехмерного проектирования // САПР и Графика. 2003. № 1. С. 170–176.

5. Косырева О.Н., Грезина А.В. Геометрическое моделирование 2D- и 3D-объектов средствами САПР AutoCAD: учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2015. Ч. 1. 81 с.

6. Анализируйте, прогнозируйте поведение и оптимизируйте инженерные расчетные проекты с помощью пакета COMSOL Multiphysics® // COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs. URL: https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics?utm_source=GT_5&utm_campaign=ru_GT_2018&utm_medium=Other&utm_content=1 (дата обращения: 25.03.2020).

7. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Энциклопедия аналитических поверхностей. М.: Либроком, 2010. 560 с.

8. Krivoshapko S.N. Geometry and strength of general helicoidal shells // Applied Mechanics Reviews. 1999, May. Vol. 52. No. 5. Pp. 161–175.

9. Rynkovskaya M.I., Elberdov T., Sert E., Öchsner A. Study of modern software capabilities for complex shell analysis // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 1. С. 45–53. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-1-45-53>

10. Бусыгина Г.М., Дремова О.В. Применение программного комплекса SCAD Office для расчета стержневых конструкций: учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей / Алт. гос. техн. ун-т имени И.И. Ползунова. Барнаул, 2015. 39 с.

11. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Малыренко А.А., Перельмутер А.В., Фиалко С.Ю. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++. М.: СКАД СОФТ, 2015. 848 с.

12. Большаков В., Бочков А., Сергеев А. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex. М.: Книга по Требованию, 2010. 336 с.

13. Погорелов В. AutoCAD 2009. 3D-моделирование. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 400 с.

14. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 192 с.

15. Jean Paul V. On the investigations of ruled helical shells in 2000–2017 // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 3. С. 9–11.

16. Демин С.И., Миколайчук В.А., Чистякова Р.Н., Кузнецова М.Д., Мозгачева К.А. Инженерные сказки: конструктор-пазл для начальной школы // Техническое творчество молодежи. 2016. № 6. С. 50–52.

Для цитирования

Жан Поль В., Эльбердов Т., Рынковская М.И. 3D-моделирование геликоидов для использования в аддитивных технологиях // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 2. С. 136–143. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-136-143>

Helicoids 3D modeling for additive technologies

Vladimir Jean Paul, Timur A. Elberdov, Marina I. Rynkovskaya

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

Article history:

Received: April 14, 2020

Revised: July 2, 2020

Accepted: July 6, 2020

Keywords:

3D modeling, helicoid, parametric modeling, additive technologies

Abstract. The article provides an analysis of modern and affordable software systems for modelling shells of complex geometry and the possibilities of using these software systems in 3D printing. Such an analysis made it possible to choose software systems that most accurately allow for the implementation of the 3D modeling method proposed in the article with subsequent printing on a 3D printer. This method is considered in detail on the example of constructing several types of helicoids. The process of 3D modeling of a helicoid is described step by step and is divided into several stages: parametric modeling of a helicoid in SCAD, editing of the resulting model in AutoCAD and its export to a special format for 3D printing. The use of the method of parametric modeling is due to its accuracy and uncompromisingness. With its help, one can accurately judge the type of the built surface. Parametric modeling is the construction of a surface by compiling equations on each axis, i.e. along the x , y , z axes, and for each type of surface there are specific characteristic equations. It is not possible to implement the method of parametric modeling in all software systems; in this connection, certain difficulties arise. The article analyzes the difficulties encountered in 3D modeling of the helicoid and suggests ways to solve them.

References

1. STL (file format). *Wikipedia is a free encyclopedia*. (In Russ.) Available from: [https://ru.wikipedia.org/wiki/STL_\(format_fayla\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/STL_(format_fayla)) (accessed: 25.03.2020).
2. *SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike [Computer Modeling in Engineering Practice] (+DVD-ROM)*. Moscow: BKhV-Peterburg Publ.; 2013. (In Russ.)
3. Autodesk 3ds Max. *Wikipedia is a free encyclopedia*. (In Russ.) Available from: https://ru.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_Max (accessed: 25.03.2020).
4. Avedyan A. SolidWorks – standart trekhmernogo proektirovaniya [SolidWorks is a 3D design standard]. *CAD and Graphics*. 2003;(1):170–176. (In Russ.)
5. Kosyreva ON, Gresina AV. *Geometricheskoe modelirovanie 2D- i 3D-ob"ektov sredstvami SAPR AutoCAD [Geometric modeling of 2D- and 3D-objects by means of CAD AutoCAD]* (part 1). Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University; 2015. (In Russ.)
6. Analiziruite, prognoziruite povedenie i optimiziruite inzhenernye raschetnye proekty s pomoshch'yu paketa COMSOL Multiphysics® [Analyze, predict, and optimize engineering design projects with COMSOL Multiphysics®]. *COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs*. (In Russ.) Available from: https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics?utm_source=GT_5&utm_campaign=ru_GT_2018&utm_medium=Other&utm_content=1 (accessed: 25.03.2020).
7. Krivoshapko SN, Ivanov VN. *Entsiklopediya analiticheskikh poverkhnostei [Encyclopedia of Analytical Surfaces]*. Moscow: Librokom Publ.; 2010. (In Russ.)
8. Krivoshapko SN. Geometry and strength of general helicoidal shells. *Applied Mechanics Reviews*. 1999(May); 52(5):161–175. (In Russ.)
9. Rynkovskaya MI, Elberdov T, Sert E, Öchsner A. Study of modern software capabilities for complex shell analysis. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(1):45–53. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-1-45-53>
10. Sygina GM, Dremova OV. *Primenenie programmnogo kompleksa SCAD Office dlya rascheta sterzhnevyykh konstruksii [Application of SCAD Office software complex for calculation of rod structures]*; educational and methodological manual for students of construction specialties. Barnaul; 2015. (In Russ.)

Vladimir Jean Paul, PhD student at Department of Civil Engineering of Academy of Engineering of RUDN University; jeanpaulvladimir@yahoo.fr

Timur A. Elberdov, master student at Department of Civil Engineering of Academy of Engineering of RUDN University.

Marina I. Rynkovskaya, Associate Professor at Department of Civil Engineering of Academy of Engineering; PhD, Docent; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2206-2563>, eLIBRARY SPIN-code: 9184-7432.

Timur A. Elberdov, master student at Department of Civil Engineering of Academy of Engineering of RUDN University.

11. Karpilovsky VS, Kriksunov EZ, Malirenko AA, Perelmuter AV, Fialko SYu. *SCAD Office. Versiya 21. Vychislitel'nyi kompleks SCAD++ [SCAD Office. Version 21. SCAD computing system]*. Moscow: SCAD SOFT; 2015. (In Russ.)

12. Bolshakov V, Bochkov A, Sergeev A. *3D-modelirovanie v AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex [3D modeling in AutoCAD, KOMPIAC-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex]*. Moscow: Kniga po Trebovaniyu Publ.; 2010. (In Russ.)

13. Pogorelov V. *AutoCAD 2009. 3D-modelirovanie [AutoCAD 2009. 3D modeling]*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg Publ.; 2009. (In Russ.)

14. Alamovsky AA. *SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike [SolidWorks 2007/2008. Computer Modeling in Engineering*

Practice]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg Publ.; 2008. (In Russ.)

15. Jean Paul V. On the investigations of ruled helical shells in 2000–2017. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;(3): 9–11.

16. Döminov SI, Mikolaychuk VA, Chistyakov RN, Kuznetsova MD, Mosgacheva KA. Engineering fairy tales: design-puzzle for primary school. *Technical creativity of youth*. 2016;(6):50–52. (In Russ.)

For citation

Jean Paul V, Elberdov TA, Rynkovskaya MI. Helicoids 3D modeling for additive technologies. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(2):136–143. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-136-143>



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-2-144-152

УДК 624.012:691.714:624.014

Научная статья

Сцепление с бетоном новых видов арматурного проката для строительства

Г.Э. Окольников^а, Г.И. Тихонов^{а,б}, Г.Е. Гришин^б^аРоссийский университет дружбы народов, *Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6*^бНаучно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона имени А. А. Гвоздева АО «НИЦ “Строительство”», *Российская Федерация, 109428, Москва, 2-я Институтская ул., д. 6, корп. 5*

История статьи:

Поступила в редакцию: 14 апреля 2020 г.

Доработана: 19 мая 2020 г.

Принята к публикации: 1 июня 2020 г.

Ключевые слова:

железобетон, арматура, сейсмостойкое строительство, арматурные соединения, винтовой профиль

Аннотация. В статье рассмотрены предпосылки и история возникновения инновационных, востребованных на сегодняшний день видов арматурного проката для строительства, их отличительные особенности и качественные показатели, приведены методология и результаты различных исследований, проведенных на базе НИИЖБ имени А.А. Гвоздева АО «НИЦ “Строительство”» и ООО «Института ВНИИЖБ железобетон». Цель исследования – ознакомление с новыми видами инновационного арматурного проката и демонстрация их преимуществ. Для испытаний, результаты и методика которых приведены в статье, были изготовлены пробные прокатки арматуры с четырехрядным винтовым профилем. По прочности и деформативности сцепления с бетоном арматура с многорядным (четырёхрядным и шестирядным) арматурным профилем существенно превзошла арматуру с двухрядным серповидным (европейским) и винтовым (аналог GEWI-Stahl) профилями. Она продемонстрировала высокие показатели сцепления с бетоном не только в эксплуатационной, но и в запредельной стадии деформирования арматуры. Новая четырехрядная винтовая арматура обладает конкурентными преимуществами относительно винтовой двухрядной арматуры (аналог GEWI-Stahl), обеспечивает качество и расширяет применение механических муфтовых соединений взамен сварных и нахлесточных. Конструктивные решения с ее применением могут успешно конкурировать с продукцией фирм Dywidag, Peikko, Halfen, Lenton и др.

Введение

От эффективности сцепления с бетоном периодического профиля поверхности арматурного проката зависит длина анкеровки арматуры на опорах железобетонных плит и балок, прочность

их наклонных сечений, момент образования и ширина раскрытия трещин, длина анкерующих стержней закладных деталей и пр.

В предварительно напряженных железобетонных элементах от вида профиля поверхности арматуры и его распорности в бетоне зависит эффективность применения высокопрочной стержневой арматуры.

Несмотря на ряд существенных недостатков, касающихся в основном технологии производства и низкой выносливости, в СССР была рекомендована для массового применения арматура с кольцевым видом профиля по ГОСТ 5781-82 (рис. 1, а) [1].

Окольникова Галина Эриковна, доцент департамента строительства Инженерной академии РУДН; кандидат технических наук, доцент; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8143-4614>, eLIBRARY SPIN-код: 8731-8713; okolnikova-ge@rudn.ru

Тихонов Георгий Игоревич, аспирант департамента строительства Инженерной академии РУДН; инженер-конструктор Проектно-конструкторского центра № 25 НИИЖБ имени А.А. Гвоздева; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7010-4118>, eLIBRARY SPIN-код: 5043-3130.

Гришин Григорий Евгеньевич, аспирант, инженер-конструктор Проектно-конструкторского центра НИИЖБ имени А.А. Гвоздева; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4646-7514>, eLIBRARY SPIN-код: 8317-3139.

© Окольникова Г.Э., Тихонов Г.И., Гришин Г.Е., 2020

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



Нормативные документы того времени для проектирования железобетонных конструкций создавались на базе результатов испытаний элементов (плит, балок стоек и т.п.), армированных кольцевой арматурой по ГОСТ 5781-82, имеющей высокие показатели сцепления с бетоном.

Железобетонные конструкции зданий и сооружений, запроектированные по СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции» имели лучшие в мире технико-экономические показатели по расходу арматуры, а их безопасность проверена длительными сроками эксплуатации [1].

Нормативными документами, разработанными для мостостроения, – СНиП 2.05.03-84*

(СП 35.13330.2011) «Мосты и трубы» до настоящего времени предусмотрено использование кольцевой арматуры по ГОСТ 5781-82, для которой из-за ее низкой выносливости введены к расчетному сопротивлению понижающие коэффициенты условий работы (m), зависящие от характеристик многократно повторяющихся циклических нагрузок и наличия сварных соединений. При $\rho = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0,5$ для А400 $m = 0,75$, а для А600 $m = 0,49$ [1].

Применение арматуры класса А500, массово используемой в обычном строительстве, данными нормами не предусмотрено.

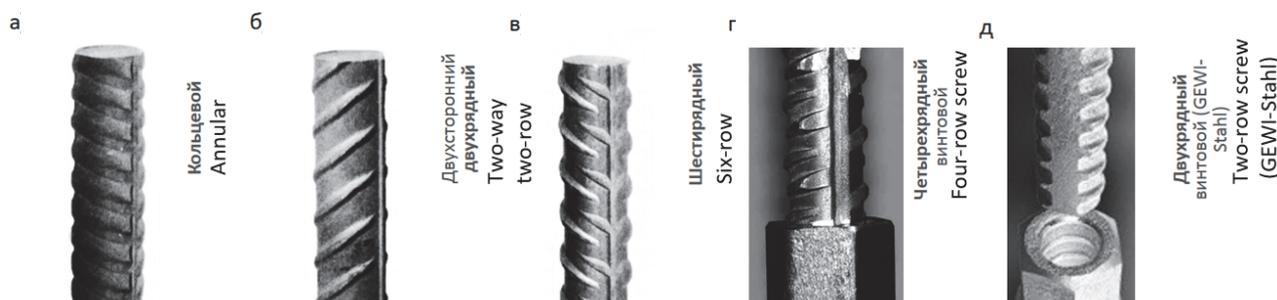


Рис. 1. Виды профилей арматурного проката [7]:

а, б – обычные; в, г – инновационные; г, д – винтовые

[Figure 1. Types of rebar profiles [7]:

а, б – normal; в, г – innovative; г, д – screw]

С 1990 г. металлурги России стали массово производить арматурный прокат для экспортной поставки в другие страны.

В соответствии с рекомендациями европейских стандартов, принятых в нормах многих стран, поставка на зарубежный рынок арматуры производится с так называемым европейским профилем, который отличается от кольцевого, производимого в СССР по ГОСТ 5781-82, незамкнутым по периметру (без пересечений с продольными ребрами) двухсторонним (двухрядным) расположением поперечных серповидных ребер (рис. 1, б). С целью унификации производства, арматура с «европейским» видом профиля стала массово внедряться в России, несмотря на то, что ее показатели сцепления с бетоном значительно ниже, чем у кольцевого профиля по ГОСТ 5781-82 [1; 2].

Внедрение нового вида профиля арматуры привело к необходимости гармонизации требований по ее сцеплению с бетоном и трещино-

стойкости железобетона отечественных стандартов с зарубежными нормами.

В СП 63.13330.2018 к СНиП 52-01-2003 рекомендованы методы расчета и конструктивные требования, учитывающие массовое внедрение в России арматуры с европейским профилем с низким браковочным значением критерия Рема ($f_R \geq 0,056$), имеющую пониженную прочность и повышенную деформативность сцепления с бетоном относительно арматуры с кольцевым профилем, по ГОСТ 5781-82.

Длина анкеровки и нахлестки стержней, а также ширина раскрытия трещин по новым нормам увеличена на 30–40 % по сравнению со старыми [1; 3].

Впервые в истории создания нормативных документов в СССР и России для проектирования железобетонных конструкций расчеты по новому нормативному документу дают результаты по расходу арматуры выше, чем по предшествующим нормам.

Применение новых требований при проектировании привело к удорожанию строительства и излишним расходам металла, используемому в строительной отрасли.

Для исправления сложившейся ситуации необходимо было принимать новые инновационные технические решения.

С 2003 г. различные исследователи и организации разрабатывают виды арматурного проката с принципиально новыми конструктивными решениями профиля поверхности [1; 3].

Успешными оказались разработка и исследование арматуры с шестирядным профилем класса А500СП с высоким критерием Рема ($f_R \geq 0,075$) (рис. 1, в). Эта арматура более 12 лет производится на ЕВРАЗ ЗСМК (Новокузнецк, Кемеровская область). К настоящему моменту использовано в железобетоне около 4 млн т подобной арматуры. В результате высокой прочности сцепления с бетоном, а также меньшей ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях, учитываемых СТО 36554501-005-2006** «Применение арматуры класса А500СП в железобетонных конструкциях», расход арматуры в элементах с ее применением снижается на 5–30 %. Подтверждена надежность и эффективность использования новой арматуры в сейсмостойком, высотном и других видах гражданского и промышленного строительства [1].

В процессе освоения производства арматуры класса А500СП экспериментально установлено, что благодаря увеличению ребренности поверхности арматуры, а следовательно, контакта с водовоздушной охлаждающей средой в процессе термомеханического упрочнения увеличиваются прочностные свойства проката. Таким образом, эффективность термоупрочнения арматуры, как и ее сцепления с бетоном, зависит от профиля поверхности стержней, характеризуемой видом профиля и критерием Рема (f_R), минимальные значения которого устанавливаются действующей нормативной документацией для массового производства арматуры (0,056), а оптимальные значения находятся в диапазоне 0,07–0,08 [1; 2].

Увеличение критерия Рема у арматуры с традиционным европейским профилем, имеющим двустороннее расположение поперечных ребер $f_R > 0,056$, возможно только за счет увеличения площади контакта поперечных ребер с бетоном (из-за чего образуется асимметрия (овальность) сечения стержней, возникают трудности по заполнению их металлом) или же за счет уменьшения

расстояния между ними, вследствие чего снижается прочность сцепления с бетоном [1].

В результате исследований установлено, что совершенствование европейского профиля технологически и практически нецелесообразно.

Арматура класса А500СП положительно зарекомендовала себя на стройках Чувашии, Удмуртии, Татарстана, Сибири и Дальнего Востока. Она применялась при строительстве олимпийских объектов и реконструкции морского порта Сочи (Краснодарский край), в высотном монолитном и сборном строительстве Москвы, Санкт-Петербурга, Астаны и Алма-Аты (Казахстан), космодрома «Восточный», атомной электростанции «Нововоронежская», а также на многих других строительных объектах.

Объемы производства и применения арматуры класса А500СП объективно подтверждают эффективность разработки и массового внедрения инновационных видов арматуры в России.

В 2016 г. началась разработка нового вида арматурного проката, сохранявшего преимущества многогранного профиля, а именно низкую распорность в бетоне, но имеющего высокие динамические показатели (выносливость при циклическом динамическом нагружении), необходимые для транспортного и других видов строительства [1; 4; 5].

При создании арматуры с новым профилем ставилась задача не только выполнить оба вышеприведенных условия, но и практически осуществить эту разработку на имеющемся у металлургов серийном двухвалковом прокатном оборудовании без значительных материальных затрат на его переделку.

Кроме того, новую арматуру предполагалось использовать в качестве винтовых крепежных элементов и винтовой арматуры с механическими муфтовыми стыковыми соединениями стержней и их анкерровкой гайками [1; 6].

Данный вид стыковки и анкерровки арматуры является предпочтительным в сейсмостойком строительстве, а также при большом насыщении ею железобетонных конструкций высотного, атомно-энергетического, гидротехнического и других видов строительства.

Задачи были успешно выполнены путем разработки и внедрения новой конструкции четырехрядного профиля арматуры с двухзаходным винтообразным расположением по поверхности серповидных ребер (рис. 1, з) [1; 7].

Данная конструкция позволяет изменять в широком диапазоне критерий Рема (f_R) и без каких-

либо технологических трудностей обеспечить его высокие браковочные значения ($f_R \geq 0,07$).

Для отработки технологии производства, оценки эффективности применения новой арматуры были произведены опытные прокатки на Тульском металлопрокатном заводе и ЕВРАЗ ЗСМК (Новокузнецк), а также исследования в НИИЖБ имени А.А. Гвоздева [7] и ООО «Институт ВНИИжелезобетон».

Для производства арматуры с винтообразным (резьбовидным) расположением поперечных ребер, позволяющим осуществить стыковку арматуры муфтами и анкеровку гайками, использовалась синхронизация прокатных валков, что несколько усложняет процесс изготовления арматуры, но обеспечивает преимущества, присущие этому виду продукции [1; 8; 9].

Результаты

Испытания по оценке прочности сцепления арматуры с бетоном проводились по методике ГОСТ Р 57357-2016 «Сталь для армирования железобетонных конструкций. Технические условия» (EN 10080:2005. Steel for the reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel. General, IDT). Метод базируется на RILEM Рекомендациях RC 6 «Испытание на сцепление арматурной стали – 2. Испытание выдергиванием» (1983).

Принцип испытания заключался в следующем. Образец упирался вертикально в опорную плиту испытательного устройства, в которой имелось центральное отверстие размером $2d$. К длинному концу арматурного стержня замоноличенного в бетонный куб с заделкой, составляющей $5d$, прикладывалось растягивающее усилие. Другой незагруженный конец стержня выступал из образца на 10 мм. Сдвиг арматуры относительно бетона измерялся в начале и в конце каждого приращения нагружения. Соотношение между усилием растяжения и сдвигом (то есть относительное смещение между арматурой и бетоном) измерялось до полного выдергивания арматуры из бетона. Растягивающую нагрузку увеличивали ступенями составляющими $\approx 10\%$ от расчетного усилия разрушения сцепления арматуры с бетоном. Выдержка после приложения каждой ступени составляла 5 мин. В процессе испытания на оборудовании «Института ВНИИжелезобетон» непрерывно регистрировалось прикладываемое к арматуре усилие и перемещение активного захвата динамометром и датчиком перемещения испытательной системы. В на-

чале и конце каждой ступени выдержки регистрировался сдвиг ненагруженного конца арматуры относительно плоскости заделки в бетонный образец и удлинение (деформация) нагруженного конца арматуры [1; 10–12]. Схема испытания в НИИЖБ имени А.А. Гвоздева АО «НИЦ “Строительство”» показана на рис. 2.

На рис. 3 приведены результаты испытаний, выполненных в ООО «Институт ВНИИжелезобетон», а на рис. 4 испытания, проведенные в НИИЖБ имени А.А. Гвоздева АО «НИЦ “Строительство”».

На рис. 3 графики левой части от вертикальной оси характеризуют величину сдвига незагруженных концов испытанных арматурных стержней двух сопоставляемых видов относительно торцевой поверхности опытных бетонных кубов, построенные вручную по показаниям приборов.

В правой части приводятся графики, оценивающие суммарную величину сдвига стержней относительно бетона и удлинение нагруженного конца арматуры в процессе поэтапного нагружения, записанные автоматическими датчиками, регистрирующими перемещение захватов испытательной машины. Эти графики наглядно иллюстрируют процесс перераспределения усилий сцепления анкерующего участка арматуры с бетоном в запредельной стадии деформирования ее нагруженного конца.

По полученным результатам испытаний в ООО «Институт ВНИИжелезобетон» можно заключить, что:

- арматура с четырехрядным винтовым профилем ($f_R = 0,072$, рис. 1, ε) имеет прочность сцепления с бетоном выше на 20–30 %, чем арматура с двухрядным винтовым профилем ($f_R = 0,091$, рис. 1, δ);

- арматура с четырехрядным расположением поперечных ребер с длиной анкеровки $5d$ сохраняет сцепление с бетоном прочностью 72,2 МПа на упругом и пластическом участках деформирования стержня.

Более того, прочность сцепления с бетоном продолжала увеличиваться при нагружении нагруженного конца стержня в зоне упрочнения до относительных деформаций, достигающих $\varepsilon = 5\%$. Всплески показаний датчиков на графиках после достижения σ_T фиксируют процесс поэтапного перераспределения усилий сцепления по длине анкерующей части стержня без потери его прочности, что свидетельствует о высокой энергоемкости сцепления новой арматуры в запредельной стадии деформирования.

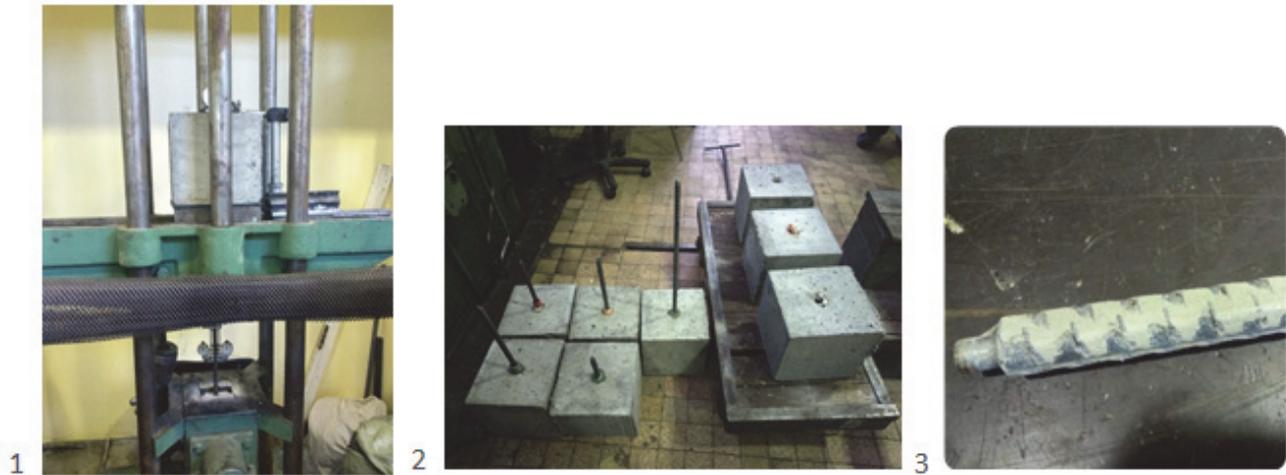


Рис. 2. Испытания для оценки прочности и деформативности сцепления арматурного проката с бетоном в НИИЖБ имени А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»» (фотографии сделаны Г.И. Тихоновым):
 1 – схема испытаний; 2 – испытанные образцы; 3 – вид арматурного стержня после испытаний

[Figure 2. Tests to assess the strength and deformability of the coupling of rebar rolled products with concrete in the NIIZHB named after A.A. Gvozdev of JSC Research Center of Construction (photos taken by Georgy I. Tikhonov):
 1 – scheme of the test; 2 – tested samples; 3 – view of the reinforcing bar after the test]

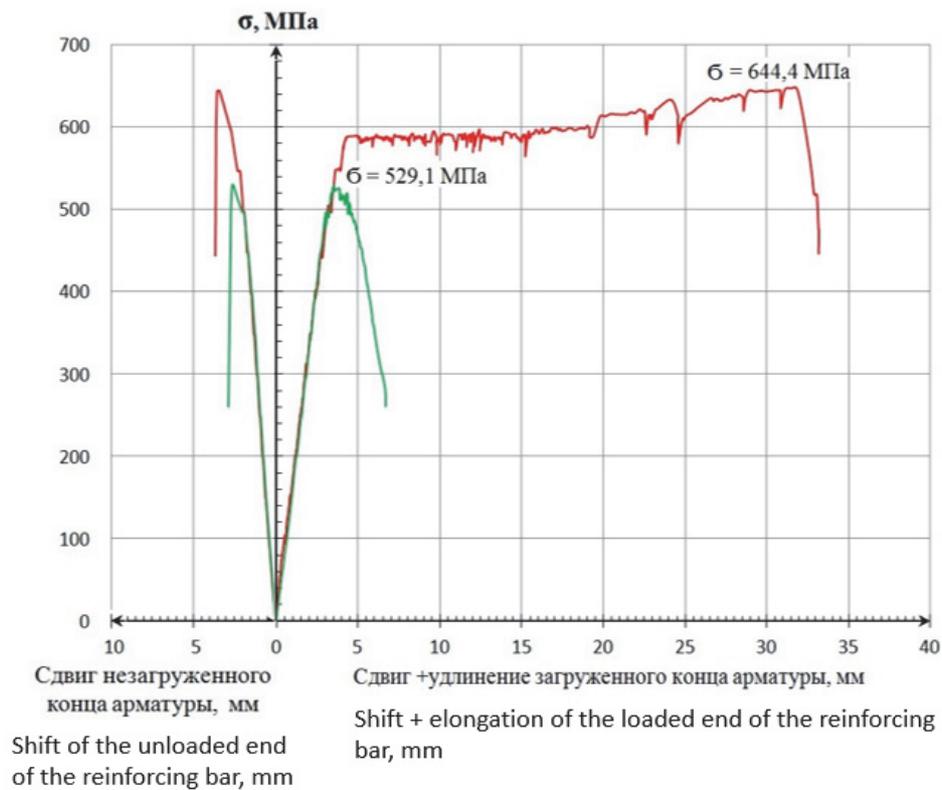


Рис. 3. Деформации втягивания незагруженного и сдвиг с удлинением загруженного концов арматуры ($d = 16$ мм, заделка $5d$) при выдергивании из бетона прочностью 72,2 МПа:

— арматура с четырехрядным винтовым профилем (Av500P) $f_r = 0,072$;

— арматура с двухрядным винтовым профилем (аналог GEWI-Stahl), $f_r = 0,091$

[Figure 3. Deformations of retraction of unloaded and shear with elongation of loaded ends of rebar ($d = 16$ mm, sealing $5d$) when pulling out of concrete with a strength of 72.2 MPa:

— armature with four-row screw profile (Av500P) $f_r = 0,072$;

— armature with double-row screw profile (GEWI-Stahl analog), $f_r = 0,091$]

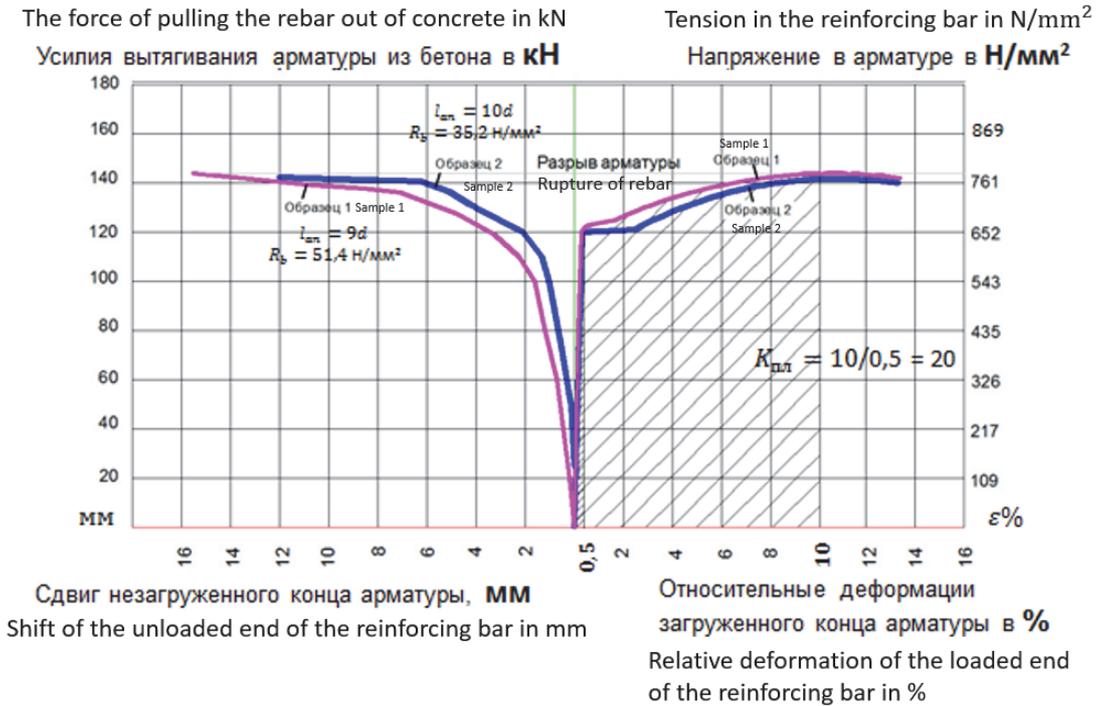


Рис. 4. Деформации вытягивания незагруженного и напряжения в металле загруженного концов арматуры с четырехрядным винтовым профилем (d 16 мм) при выдергивании из бетона:

- образец 1, $A_s = 184 \text{ мм}^2$, $R_b = 51,4 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_T = 652 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_B = 783 \text{ Н/мм}^2$, $N = 144 \text{ кН}$, разрушение от разрыва арматуры, длина анкеровки стержня $9d$;
- образец 2, $A_s = 184 \text{ мм}^2$, $R_b = 35,2 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_T = 660 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_B = 777 \text{ Н/мм}^2$, $N = 143 \text{ кН}$, разрушение от разрыва арматуры, длина анкеровки стержня $10d$

[Figure 4. Deformations of retraction of unloaded and stress in metal of loaded ends of rebar with a four-row screw profile (d 16 mm) when pulling out of concrete:

- sample 1, $A_s = 184 \text{ мм}^2$, $R_b = 51,4 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_T = 652 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_B = 783 \text{ Н/мм}^2$, $N = 144 \text{ кН}$, failure due to rupture of the reinforcement, the length of the anchoring rod $9d$;
- sample 2, $A_s = 184 \text{ мм}^2$, $R_b = 35,2 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_T = 660 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_B = 777 \text{ Н/мм}^2$, $N = 143 \text{ кН}$, failure due to rupture of the reinforcement, the length of the anchoring rod $10d$]

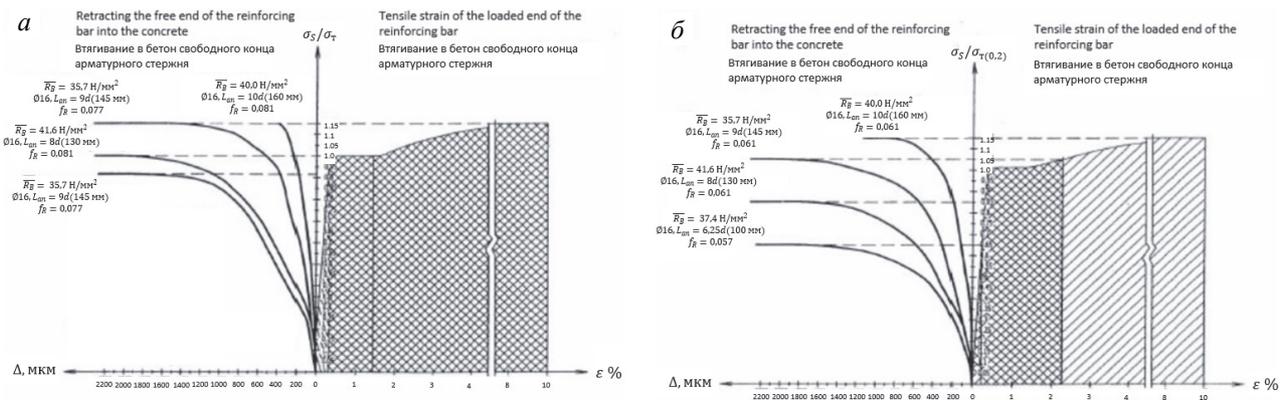


Рис. 5. Деформации втягивания незагруженного конца стержня и энергоемкость разрушения сцепления арматуры \varnothing 16 мм с бетоном:

a – А500СП; **б** – А500С

[Figure 5. Retraction deformations of the unloaded end of the rod and the energy consumption of breaking the coupling of the reinforcement \varnothing 16 mm with concrete: **a** – А500СП; **б** – А500С]

По приведенным на рис. 4 результатам испытаний, выполненных в НИИЖБ имени А.А. Гвоздева АО «НИЦ “Строительство”», видно, что при увеличении длины анкеровки арматуры с четырехрядным винтовым профилем до $9d$ и $10d$ можно достигнуть разрушения сцепления с бетоном практически одновременно с достижением в загруженном конце арматурного стержня временного сопротивления и его разрыва при больших упруго-пластических относительных деформациях, достигающих $\varepsilon = 10\%$ и более [1; 13; 14].

Полученные результаты исследований подтверждают результаты выполненных ранее работ, приведенных на рис. 5, и позволяют с еще большим основанием сделать выводы об эффективности применения арматуры с многорядным периодическим профилем из-за его меньшей распорности в бетоне и высокой энергоемкости сцепления для обеспечения перераспределения усилий и диссипации (рассеяния) энергии в железобетонных конструкциях, определяющих высокую надежность их сопротивления различным видам нагружения [1; 6; 7; 15].

Заключение

По прочности и деформативности сцепления с бетоном арматура с многорядным (четырёхрядным и шестирядным) арматурным профилем существенно превосходит арматуру с двухрядным серповидным (европейским) и винтовым (аналог GEWI-Stahl) профилями. Она имеет высокие показатели сцепления с бетоном не только в эксплуатационной, но и в запредельной стадии деформирования арматуры, что особенно важно для безопасности зданий и сооружений при воздействии особых нагрузок (взрывных, ударных, сейсмических и т.п.).



Рис. 6. Общий вид четырехрядной винтовой арматуры (фотография сделана Г.И. Тихоновым)
[Figure 6. General view of four-row screw rebar (photo taken by Georgy I. Tikhonov)]

Принимая во внимание технологичность производства и применения, высокие показатели сцепления с бетоном, можно заключить, что новая четырехрядная винтовая арматура обладает кон-

курентными преимуществами относительно винтовой двухрядной арматуры (аналог GEWI-Stahl), обеспечивает качество и расширяет применение механических муфтовых соединений взамен сварных и нахлесточных (рис. 6). Конструктивные решения с ее применением могут успешно конкурировать с продукцией фирм Dywidag, Peikko, Halfen, Lenton и др.

Участие авторов

Г.Э. Окольникова – научное руководство. *Г.И. Тихонов* – проведение экспериментов, написание статьи. *Г.Е. Гришин* – проведение экспериментов, написание статьи.

Благодарности

Выражаем благодарность Игорю Николаевичу Тихонову, автору арматуры класса Ав500П, за предоставление информации по арматуре с четырехрядным винтовым профилем.

Список литературы

1. Тихонов И.Н., Смирнова Л.Н., Бубис А.А., Тихонов Г.И., Сафонов А.А. О новых видах арматурного проката для сейсмостойкого строительства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 6. С. 20–27.
2. Саврасов И.П. Прочность, трещиностойкость и деформативность изгибаемых железобетонных элементов, армированных сталью класса А500 с различным периодическим профилем: дис. ... к. т. н. М.: НИИЖБ имени А.А. Гвоздева, 2010. 207 с.
3. Тихонов И.Н., Елишина Л.И. О влиянии свойств новых видов арматурного проката на надежность и экономическую эффективность железобетонных конструкций // Вестник «НИЦ “Строительство”». 2017. № 1 (12). С. 54–68.
4. Тихонов И.Н., Мешков В.З., Звездов А.И., Саврасов И.П. Эффективная арматура для железобетонных конструкций зданий, проектируемых с учетом воздействия особых нагрузок // Строительные материалы. 2017. № 3. С. 39–45.
5. Мулин Н.М. Стержневая арматура железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1974. 233 с.
6. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. М., 2000. 256 с.
7. Тихонов И.Н., Блажек В.П., Тихонов Г.И., Казарян В.А., Краковский М.В., Цыба О.О. Инновационные решения для эффективного армирования железобетонных конструкций // Жилищное строительство. 2018. № 8. С. 5–10.
8. Скоробогатов С.М. Основы теории расчета выносливости стержней арматуры железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1976. 108 с.

9. *Городницкий Ф.М., Михайлов К.В.* Выносливость арматуры железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1972. 151 с.

10. *Тихонов И.Н., Мешков В.З., Расторгуев Е.С.* Проектирование армирования железобетона / ЦИТП имени Г.К. Орджоникидзе. М., 2015. 273 с.

11. *Тихонов И.Н.* Разработка, производство и внедрение инновационных видов арматурного проката для строительства // Строительные материалы. 2019. № 9. С. 67–75.

12. *Цыба О.О.* Трещиностойкость и деформативность растянутого железобетона с ненапрягаемой стержневой арматурой, имеющей различную относительную площадь смятия поперечных ребер: дис. ... к. т. н. М.: НИИЖБ имени А.А. Гвоздева, 2012. 203 с.

13. *Тихонов И.Н., Мешков В.З., Расторгуев Б.С.* Проектирование армирования железобетона. М.: ООО «Бумажник», 2015. 273 с.

14. *Тихонов И.Н., Гуменюк В.С., Казарян В.А.* Несущая способность сжатых железобетонных элементов с холоднодеформированной рабочей арматурой класса В500С // Жилищное строительство. 2016. № 10. С. 25–29.

15. *Квасников А.А.* Методика расчета взаимодействия бетона и арматуры железобетонных конструкций в программном комплексе Abaqus // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 1. С. 65–70.

Для цитирования

Окольникова Г.Э., Тихонов Г.И., Гришин Г.Е. Сцепление с бетоном новых видов арматурного проката для строительства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 2. С. 144–152. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-144-152>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-2-144-152

Research article

Adhesion to concrete of new types of rebar rolled products for construction

Galina E. Okolnikova^a, Georgy I. Tikhonov^{a,b}, Grigori E. Grishin^b

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

^bResearch Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev of JSC Research Center of Construction, 6 2-ya Institut'skaya St, bldg 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Article history:

Received: April 14, 2020

Revised: May 19, 2020

Accepted: June 1, 2020

Keywords:

reinforced concrete, rebar, earthquake-resistant construction, rebar connections, screw profile

Abstract. This article discusses the background and history of the emergence of innovative, popular today, types of rebar for construction, their distinctive features and quality indicators, the methodology and results of various studies conducted on the basis of NIIZHB named after A.A. Gvozdev of JSC Research Center of Construction and LLC "Technological Institute 'VNIIZhelezbeton' ". The purpose of this article is to introduce new types of innovative rebar products and demonstrate their advantages. For the tests, the results and methods of which are given in the article, test rolls of rebar with a four-row screw profile were made. In terms of strength and deformability of adhesion to concrete, the reinforcement with multi-row (four-row and six-row) reinforcement profiles significantly surpassed the reinforcement with two-row crescent (European) and screw (GEWI-Stahl analog) profiles. It has demonstrated high adhesion to concrete not only in the operational, but also in the extreme stage of deformation of the reinforcement. This article discusses the background and history of the emergence of innovative, popular today, types of rebar for construction, their distinctive features and quality indicators, the methodology and results of various studies conducted on the basis of NIIZHB named after A.A. Gvozdev of JSC Research Center of Construction and LLC "Technological Institute 'VNIIZhelezbeton' ". The purpose of this article is to introduce new types of innovative rebar

Galina E. Okolnikova, Associate Professor of Department of Construction of Academy of Engineering of RUDN University; Candidate of Sciences in Technology; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8143-4614>, eLIBRARY SPIN-code: 8731-8713; okolnikova-ge@rudn.ru

Georgy I. Tikhonov, postgraduate student of Department of Construction of Academy of Engineering of RUDN University, design engineer of Design Center No. 25 of NIIZHB named after A.A. Gvozdev; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7010-4118>, eLIBRARY SPIN-code: 5043-3130.

Grigori E. Grishin, postgraduate student, design engineer of Design Center No. 25 of NIIZHB named after A.A. Gvozdev; ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4646-7514>, eLIBRARY SPIN-code: 8317-3139.

products and demonstrate their advantages. For the tests, the results and methods of which are given in the article, test rolls of rebar with a four-row screw profile were made. In terms of strength and deformability of adhesion to concrete, the reinforcement with multi-row (four-row and six-row) reinforcement profiles significantly surpassed the reinforcement with two-row crescent (European) and screw (GEWI-Stahl analog) profiles. It has demonstrated high adhesion to concrete not only in the operational, but also in the extreme stage of deformation of the reinforcement.

Author's contribution

Galina E. Okolnikova – supervision. Georgy I. Tikhonov – analysis of information and writing article. Grigoriy E. Grishin – analysis of information and writing article.

Acknowledgements

We express our gratitude to Igor Nikolaevich Tikhonov, the author of the Av500P class rebar, for providing information on rebar with a four-row screw profile.

References

1. Tikhonov IN, Smirnova LN, Bubis AA, Tikhonov GI, Safonov AA. About new types of rebar rolled products for earthquake-resistant construction. *Earthquake engineering. Safety of structures*. 2019;(6):20–27. (In Russ.)

2. Savrasov IP. *Prochnost', treshchinostoikost' i deformativnost' izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, armirovannykh stal'yu klassa A500 s razlichnym periodicheskim profilem* [Strength, crack resistance and deformability of bent concrete elements reinforced with A500 class steel with various periodic profiles] (Dissertation of the Candidate of Technical Sciences). Moscow: NIIZHB named after A.A. Gvozdev; 2010. (In Russ.)

3. Tikhonov IN, Elshina LI. On the influence of properties of new types of rebar on the reliability and economic efficiency of reinforced concrete structures. *Bulletin of Science and Research Center "Stroitelstvo"*. 2017; (1(12)):54–68. (In Russ.)

4. Tikhonov IN, Meshkov VZ, Zvezdov AI, Savrasov IP. Effective reinforcement for reinforced concrete building structures, designed taking into account the impact of the special loads. *Construction materials*. 2017; (3):39–45. (In Russ.)

5. Mulin NM. *Sterzhnevaya armatura zhelezobetonnykh konstruksii* [Rod armature of reinforced concrete structures]. Moscow: Stroizdat Publ.; 1974. (In Russ.)

6. Madatyan SA. *Armatura zhelezobetonnykh konstruksii* [Armature of reinforced concrete structures]. Moscow; 2000. (In Russ.)

7. Tikhonov IN, Blazhko VP, Tikhonov GI, Kazarian VA, Krakovsky MV, Tsyba OO. Innovative solutions for effective reinforcement of reinforced concrete structures. *Housing construction*. 2018;(8):5–10. (In Russ.)

8. Skorobogatov SM. *Osnovy teorii rascheta vynoslivosti sterzhnei armatury zhelezobetonnykh konstruksii*

[Fundamentals of the theory of calculating the endurance of rebar rods of reinforced concrete structures]. Moscow: Stroizdat Publ.; 1976. (In Russ.)

9. Gorodnitsky FM, Mikhailov KV. *Vynoslivost' armatury zhelezobetonnykh konstruksii* [Endurance of reinforced concrete structures reinforcement]. Moscow: Stroizdat Publ.; 1972. (In Russ.)

10. Tikhonov IN, Meshkov VZ, Rastorguev ES. *Proektirovanie armirovaniya zhelezobetona* [Design of reinforced concrete reinforcement]. Moscow: TSITP named after G.K. Ordzhonikidze; 2015. (In Russ.)

11. Tikhonov IN. Development, production and implementation of innovative types of rebar rolled products for construction. *Construction materials*. 2019;(9):67–75. (In Russ.)

12. Tsiba OO. *Treshchinostoikost' i deformativnost' rastyanutogo zhelezobetona s nenapryagaemoi sterzhnevoi armaturoi, imeyushchei razlichnyuyu otositel'nyuyu ploshchad' smyatiya poperechnykh reber* [Crack resistance and deformability of stretched reinforced concrete with non-stressed rod reinforcement having different relative area of cross-rib crumpling] (Dissertation of the Candidate of Technical Sciences). Moscow: NIIZHB named after A.A. Gvozdev; 2012. (In Russ.)

13. Tikhonov IN, Meshkov VZ, Rastorguev BS. *Proektirovanie armirovaniya zhelezobetona* [Design of reinforced concrete reinforcement]. Moscow: LLC "Bumazhnik"; 2015. (In Russ.)

14. Tikhonov IN, Gumenuk VS, Kazaryan VA. Load-bearing capacity of compressed reinforced concrete elements with cold-formed working fittings of class B500C. *Housing construction*. 2016;(10):25–29. (In Russ.)

15. Kvasnikov AA. Method for calculating the interaction of concrete and reinforced concrete structures in the Abaqus software package. *Construction mechanics and calculation of structures*. 2019;(1):65–70. (In Russ.)

For citation

Okolnikova GE, Tikhonov GI, Grishin GE. Adhesion to concrete of new types of rebar rolled products for construction. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020; 21(2):144–152. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-2-144-152>

АБОНЕМЕНТ на газету 18230
(индекс издания)

журнал

Вестник РУДН. Серия:
Инженерные исследования
(наименование издания)

Количество комплектов	
-----------------------	--

На 2021 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Куда
(почтовый индекс) (адрес)

Кому _____
(фамилия, инициалы)

Линия отреза

			ДОСТАВОЧНАЯ	18230
<small>ПВ</small>	<small>место</small>	<small>литер</small>	КАРТОЧКА	<small>(индекс издания)</small>

на газету Вестник РУДН.
 журнал Серия: Инженерные исследования
(наименование издания)

Стоимость	подписки	руб.	Количество комплектов	
	каталожная	руб.		
	пере-адресовки	руб.		

На 2021 год по месяцам

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

<small>город</small>													
<small>село</small>													
<small>почтовый индекс</small>					<small>область</small>								
<small>район</small>													
<small>код улицы</small>					<small>улица</small>								
<small>дом</small>	<small>корпус</small>	<small>квартира</small>	<small>фамилия, инициалы</small>										

