



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

Том 20 № 2 (2019)

DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2

<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

Заместитель главного редактора

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

Ответственный секретарь

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

Члены редакционной коллегии

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

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

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

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

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

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

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

Мальшиев Вениамин Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой системного анализа, Московский авиационный институт

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

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

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

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

Агравал Бридж – профессор Навал Постградуейт Скул, Монтерей, США

Варатараджу Ренугант – профессор Университета Путра Малайзия, Малайзия

Герман Анна – профессор Университета Бейра Интериор, Португалия

Грациани Филиппо – профессор Римского университета «Ла Сапиенца», Италия

Мисра Арун – профессор Университета МакГилл, Канада

Мортари Даниэль – профессор Техасского университета А&М, США

Спенсер Дэвид – профессор Университета Пенн Стейт, США

Фурфаро Роберто – профессор Университета Аризоны, США

Хоуэлл Кэтлин – профессор, Университет Пердью, Уэст-Лафайетт, США

Ясака Тетсуо – почетный профессор, Университет Кюсю, Япония

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

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

Периодичность 4 выпуска в год.

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

Языки: русский, английский.

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

Подписной индекс по каталогу агентства «Роспечать» – 18230.

Цель и тематика

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

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

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

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

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

Подписано в печать 04.11.2019. Выход в свет 11.11.2019. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 11,62. Тираж 500 экз. Заказ № 619. Цена свободная.

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

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



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

Volume 20 Number 2 (2019)

DOI: 10.22363/2312-8143-2019-20-2

<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)

Associate Editor-in-Chief

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

Assistant to the Editor-in-Chief

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Valeriy M. Fomin – Professor, Moscow Polytechnic University

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

Renuganth Varatharajoo – Professor, University Putra Malaysia, Malaysia

Anna Guerman – Professor, Universidade da Beira Interior, Portugal

Filippo Graziani – Professor, University Roma “La Sapienza”, Italy

Arun Misra – Professor, McGill University, Canada

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

David Spencer – Professor, Penn State University, USA

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

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

Tetsuo Yasaka – Professor Emeritus, Kyushu University, Japan

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

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

Published 4 times a year.

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

Languages: Russian, English.

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

Aims and Scope

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

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

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

Address of the editorial board:

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

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

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

Printing run 500 copies. Open price.

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

© Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 2019

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- Разумный В.Ю., Баранов А.А., Разумный Ю.Н.** Проектирование орбитального построения космической системы для обслуживания космических аппаратов системы Globalstar 111
- Иванова Ю.Н., Иванов К.С., Бондарева М.К., Ермолаев В.А., Жуков А.О.** Опыт и возможности применения космических систем дистанционного зондирования Земли для прогнозирования золоторудного оруденения на труднодоступных территориях на примере Полярного Урала 123

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Белоусов Ю.В., Клеймяк И.А., Страшнов С.В.** Разработка методики расчета круговых прерывистых сварных швов на кручение 134
- Мамаев В.К., Виноградов Л.В., Ощепков П.П.** Моделирование решетки профилей транспортного газотурбинного двигателя 140
- Лапин М.В., Гринин А.О., Шкарин К.В., Сури К.** Обеспечение работоспособности акустических расходомеров вне пределов оптимальных значений расхода жидкости 147
- Топчий Д.В., Болотова А.С., Воробьев А.С., Атаманенко А.В.** Техническое нормирование технологии устройства железобетонных плит перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей 155
- Голиков А.В., Михальчонок Е.А.** Определение рациональной конструктивной формы ба-шен сотовой связи 163

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- Шарафельдин Х.Э., Верчеба А.А.** Перспективы золотоносности железисто-кремнистой формации Египта и Курской магнитной аномалии 174
- Беленикин В.В., Пулькова А.С.** Сравнительная характеристика физико-механических свойств андезито-базальтов вулканов Зимины и Камень 184
- Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Разоренов Ю.И.** Использование остаточной прочности пород в несущих конструкциях при подземной добыче руд 193

CONTENTS

AEROSPACE ENGINEERING

- Razoumny V.Yu., Baranov A.A., Razoumny Yu.N.** Satellite constellation design of on-orbit servicing space system for Globalstar satellites 111
- Ivanova Ju.N., Ivanov K.S., Bondareva M.K., Ermolaev V.A., Zhukov A.O.** Experience and opportunities of space systems applications of Earth remote sensing to prediction gold mineralization on difficult to approach areas on the example of the Polar Urals 123

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

- Belousov Yu.V., Kleymuk I.A., Strashnov S.V.** Development of methodology for calculation of discontinuous circular welds in torsion 134
- Mamaev V.K., Vinogradov L.V., Oschepkov P.P.** Modeling the set of blade profiles of a gas turbine engine 140
- Lapin M.V., Grinin A.O., Shkarin K.V., Soury K.** Acoustic flow meter performance assurance outside the limits of measurement 147
- Topchiy D.V., Bolotova A.S., Vorobev A.S., Atamanenko A.V.** Technical rationing of the construction technology of reinforced concrete floor slabs using non-removable void formers 155
- Golikhov A.V., Mikhailchonok E.A.** Determination of the rational constructive form of cellular communication towers 163

EARTH SCIENCE

- Sharafeldin H.E., Vercheba A.A.** Perspective of gold-bearing deposits in the ferruginous-siliceous formations of Egypt and Kursk Magnetic Anomaly 174
- Belenikin V.V., Pulkova A.S.** Comparative characteristics of the physical and mechanical properties of andesite-basalts of Zimin and Kamen volcanoes 184
- Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z., Razorenov Yu.I.** Use of residual rock strength in bearing structures in underground ore mining 193

АВИАЦИОННАЯ И КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА
AEROSPACE ENGINEERINGDOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-111-122
УДК 629.78

Научная статья

Проектирование орбитального построения космической системы
для обслуживания космических аппаратов системы Globalstar

В.Ю. Разумный, Ю.Н. Разумный

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

А.А. Баранов

Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., 4
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

История статьи:

Поступила в редакцию: 25 апреля 2019

Доработана: 20 июня 2019

Принята к публикации: 28 июня 2019

Ключевые слова:

космический комплекс; орбитальное сервисное обслуживание; орбитальная станция; орбитальный модуль; суммарная характеристическая скорость; портрет отклонений долгот восходящих узлов; некомпланарные орбиты; компланарные орбиты; межорбитальные перелеты

Рассматривается задача баллистического проектирования космического комплекса технического обслуживания действующих спутников Globalstar, находящихся на орбитах с близкими высотами и наклонениями, но существенно отличающихся по долготе восходящего узла (десятки градусов). В качестве космического комплекса технического обслуживания принимается система орбитальных станций, предназначенная для обслуживания отделяемых орбитальных модулей. В течение заданного промежутка времени необходимо подлететь к каждому из спутников, требующих обслуживания. Указанная некомпланарность орбит приводит к большим затратам суммарной характеристической скорости (топлива), необходимой обслуживающим космическим аппаратам (КА) для перелетов к обслуживаемым спутникам. В статье приводится пример решения задачи проектирования орбит обслуживающей системы на основе разработанной методики оптимального планирования обслуживания с применением современных алгоритмов оценки энергетике перелетов в окрестности обслуживаемых КА, позволяющих существенно снизить затраты топлива на перелеты. Проектирование орбитального построения станций и оптимальное планирование обслуживания осуществляются на основе анализа портрета отклонений долгот восходящих узлов всех обслуживаемых и обслуживающих КА. Показано, что предложенный методический подход позволяет определять необходимое число орбитальных станций, элементы их орбит, число отделяемых от них обслуживающих модулей и общие затраты суммарной характеристической скорости, требуемые для обслуживания заданной группировки КА.

Введение

Повышение эффективности функционирования спутниковых систем неразрывно связано с про-

ведением своевременного технического обслуживания и ремонта вышедших из строя отдельных спутников непосредственно на орбите. Известные технические решения данной области направлены на проектирование маневров перехода между космическими аппаратами с целью проведения сервисного обслуживания на орбите [1], создание средств такого сервисного обслуживания [2], оптимизацию маневрирования в районе геостационарной орбиты [3] и др. Вместе с тем общий подход к проектированию орбитального построения космической системы технического обслуживания (ККТО) на низких орбитах, излагаемый в настоящей статье, ранее не рассматривался.

Низкие орбиты характеризуются скоплением космических аппаратов (КА) на существенно от-

Разумный Владимир Юрьевич – доцент департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН; gazumnyy-vuy@rudn.ru; ORCID iD: 0000-0001-6373-4608, eLIBRARY SPIN-код: 6860-2153.

Баранов Андрей Анатольевич – ведущий научный сотрудник ИПМ имени М.В. Келдыша РАН, профессор департамента механики и мехатроники Института космических технологий Инженерной академии РУДН, кандидат физико-математических наук; ORCID iD: 0000-0003-1823-9354, eLIBRARY SPIN-код: 6606-3690.

Разумный Юрий Николаевич – директор департамента механики и мехатроники Института космических технологий, директор Инженерной академии РУДН, доктор технических наук, профессор, академик Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского, академик Международной академии астронавтики; ORCID iD: 0000-0003-1337-5672, eLIBRARY SPIN-код: 7704-4720.

© Разумный В.Ю., Баранов А.А., Разумный Ю.Н., 2019

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



личающихся орбитах, что делает орбитальное сервисное обслуживание чрезмерно затратным с точки зрения расхода топлива на операции выведения обслуживающих КА к обслуживаемым. Для КА на таких орбитах орбитальное сервисное обслуживание оказывается целесообразным проводить с помощью ККТО, состоящего из совокупности орбитальных станций (ОС), предназначенных для орбитального сервисного обслуживания КА с помощью находящихся на указанных станциях отделяемых орбитальных модулей (ОМ) возвращаемого или невозвращаемого типа (далее рассматриваются только модули возвращаемого типа, что не исключает применение этого же подхода и для более простого случая невозвращаемых модулей) [4; 5].

Основной этап решения задачи проектирования орбитального построения ККТО *состоит в определении минимального количества орбитальных станций и их орбитального расположения* при имеющихся ограничениях на число орбитальных модулей на каждой станции, ограничении на количество топлива на каждом модуле и на станции в целом, ограничении на продолжительность времени обслуживания и т.д. *Основной этап, в свою очередь, включает результаты двух вспомогательных этапов: этапа оптимального планирования обслуживания и этапа оценки затрат топлива, необходимого орбитальному модулю для перелета в окрестности обслуживаемых спутников (целевых КА) с помощью двигательных установок большой и малой тяги.*

На этапе оптимального планирования обслуживания каждому целевому КА назначается один из орбитальных модулей, отделяемых от ори-

тальных станций, а также определяется оптимальная последовательность обслуживания такими модулями целевых КА в течение заданного периода времени обслуживания, включая оптимизацию обслуживания каждым модулем нескольких выделенных для него целевых КА в течение одного вылета модуля со станции. Методический подход к решению задачи планирования обслуживания приведен в [6]. В указанной статье приведен общий алгоритм и численные примеры расчета конфигурации (орбитального построения) ККТО для обслуживания действующих (без учета резервных) КА системы Globalstar (целевые КА) на основе использования портрета отклонений долгот восходящих узлов (ДВУ) орбит этих целевых КА.

1. Построение и анализ портрета отклонений долгот восходящих узлов орбит целевых КА

КА системы Globalstar находятся на круговых орбитах с близкими значениями наклонения, расположенных в орбитальных плоскостях, существенно разнесенных по долготе восходящего узла (десятки градусов). Система Globalstar включает как действующие, так и нефункционирующие (резервные) КА, находящиеся на орбитах с существенно отличающимися высотами. Параметры орбит КА системы Globalstar – большая полуось a_f , эксцентриситет e_f , наклонение i_f , аргумент перигея ω_f , долгота восходящего узла Ω_f , аргумент широты u_f – представлены в табл. 1 [7]. Орбиты этих КА мало отличаются по эксцентриситету и наклонению, но имеют существенные отличия по величине большой полуоси.

Таблица 1

Параметры орбит целевых КА Globalstar
[Table 1. Globalstar spacecraft (SC) orbit parameters]

№	КА [SC]	T (сек.) [sec.]	a (км) [km]	e	i (град.) [deg.]	ω (град.) [deg.]	Ω (град.) [deg.]	u (град.) [deg.]
1	GS-M001	6978,53	7892,87	0,00010	52,00	320,75	261,77	206,39
2	GS-M002	7438,92	8236,31	0,00010	52,00	307,60	13,07	52,47
3	GS-M003	7129,31	8006,16	0,00066	51,98	230,84	25,55	299,44
4	GS-M004	6839,44	7787,64	0,00027	52,00	334,49	51,33	204,18
5	GS-M006	7460,00	8251,86	0,00036	52,00	344,58	297,66	187,55
6	GS-M008	6990,53	7901,92	0,00030	52,00	180,60	91,91	207,39
7	GS-M014	7413,70	8217,68	0,00008	51,99	98,25	359,28	78,95
8	GS-M015	7520,78	8296,62	0,00132	51,98	24,77	254,38	99,37
9	GS-M019	7118,15	7997,80	0,00006	51,99	243,90	323,05	286,87
10	GS-M022	7185,50	8048,17	0,00021	52,01	229,61	349,52	249,41
11	GS-M023	6844,37	7791,39	0,00108	52,01	188,11	33,75	251,29
12	GS-M024	7782,87	8488,26	0,00023	52,00	117,15	103,94	46,52
13	GS-M025	7696,97	8425,70	0,00010	51,98	76,22	67,61	94,61
14	GS-M026	6844,79	7791,71	0,00028	52,00	322,19	301,95	82,21
15	GS-M027	7823,60	8517,85	0,00219	52,02	77,28	94,04	310,75

Продолжение табл. 1 [Table 1, continuation]

№	КА [SC]	T (сек.) [sec.]	a (км) [km]	e	i (град.) [deg.]	ω (град.) [deg.]	Ω (град.) [deg.]	u (град.) [deg.]
16	GS-M028	6909,37	7840,64	0,00632	51,97	251,85	338,33	107,55
17	GS-M029	7201,05	8059,78	0,00029	51,98	188,97	115,42	323,55
18	GS-M030	7480,20	8266,74	0,00032	51,99	288,50	241,35	71,55
19	GS-M031	7105,60	7988,40	0,00015	52,00	83,06	23,59	290,11
20	GS-M032	7721,00	8443,22	0,00012	52,00	184,63	93,51	175,45
21	GS-M033	7080,50	7969,57	0,00117	51,99	114,19	342,24	246,02
22	GS-M034	7325,90	8152,67	0,00140	51,99	6,21	64,57	105,87
23	GS-M035	7822,52	8517,08	0,00136	52,00	52,43	58,07	104,55
24	GS-M036	7281,60	8119,77	0,00112	52,00	294,27	45,41	166,13
25	GS-M037	6844,66	7791,61	0,00013	52,00	191,43	164,87	197,47
26	GS-M038	7010,59	7917,03	0,00024	52,00	99,42	266,73	34,20
27	GS-M039	6845,27	7792,07	0,00038	51,98	44,09	249,81	316,03
28	GS-M040	6847,02	7793,40	0,00008	51,99	102,75	31,61	318,33
29	GS-M041	7220,53	8074,31	0,00037	52,00	92,23	137,41	346,39
30	GS-M042	7070,41	7962,00	0,00034	52,00	123,07	69,95	43,37
31	GS-M043	7675,58	8410,07	0,00138	51,94	124,87	44,21	308,34
32	GS-M044	7259,41	8103,27	0,00051	52,00	239,77	251,22	284,36
33	GS-M045	7041,90	7940,58	0,00003	52,00	55,36	46,78	354,78
34	GS-M046	7144,48	8017,51	0,00025	52,01	225,32	52,68	168,58
35	GS-M047	7633,26	8379,14	0,00172	51,98	36,87	237,50	323,32
36	GS-M048	7620,34	8369,67	0,00131	51,94	270,46	58,15	130,58
37	GS-M049	7769,18	8478,31	0,00020	51,99	350,23	307,70	9,84
38	GS-M050	7156,03	8026,15	0,00097	52,00	40,20	256,85	26,24
39	GS-M051	7564,63	8328,83	0,00008	51,98	193,25	240,29	292,29
40	GS-M052	7748,74	8463,44	0,00032	51,99	125,82	99,29	278,46
41	GS-M053	7662,11	8400,23	0,00024	52,00	254,27	153,65	286,81
42	GS-M054	7584,46	8343,38	0,00060	52,02	243,17	15,37	286,34
43	GS-M055	7028,22	7930,30	0,00067	52,00	229,26	140,43	207,79
44	GS-M056	7171,85	8037,97	0,00009	52,00	196,77	307,06	330,24
45	GS-M057	7054,67	7950,18	0,00034	52,00	170,02	54,98	190,07
46	GS-M058	7241,68	8090,07	0,00015	52,00	98,71	20,72	340,30
47	GS-M059	7200,49	8059,36	0,00015	52,00	78,07	224,79	352,30
48	GS-M060	7096,20	7981,35	0,00026	52,00	347,69	3,30	27,17
49	GS-M061	7342,40	8164,91	0,00051	51,98	330,34	207,73	164,95
50	GS-M062	6949,03	7870,61	0,00068	51,98	43,53	116,45	333,92
51	GS-M063	6844,82	7791,73	0,00018	52,00	162,06	75,31	0,80
52	GS-M064	7269,89	8111,06	0,00015	52,00	278,83	45,16	81,23
53	GS-M065	6844,83	7791,74	0,00010	51,99	117,31	205,18	22,35
54	GS-M066	6844,82	7791,73	0,00003	51,97	40,34	335,22	357,81
55	GS-M067	6844,84	7791,74	0,00001	51,98	78,02	23,74	357,72
56	GS-M068	6842,57	7790,02	0,00007	51,99	123,75	291,09	279,93
57	GS-M069	6844,83	7791,74	0,00009	51,99	132,79	164,05	36,68
58	GS-M070	6844,83	7791,74	0,00014	51,98	127,61	115,46	28,13
59	GS-M071	6844,80	7791,71	0,00024	52,01	92,66	166,98	80,03
60	GS-M072	6844,80	7791,71	0,00008	52,01	53,70	257,50	71,07
61	GS-M073	6844,84	7791,75	0,00005	52,01	116,06	73,24	44,05
62	GS-M074	6844,82	7791,73	0,00006	52,00	114,75	119,04	259,46
63	GS-M075	6844,85	7791,75	0,00014	51,99	101,59	162,08	286,99
64	GS-M076	6844,89	7791,78	0,00003	52,00	292,29	118,82	87,62
65	GS-M077	6844,86	7791,76	0,00009	52,01	128,77	76,53	25,45
66	GS-M078	6844,84	7791,74	0,00007	51,99	51,98	297,53	308,12
67	GS-M079	6844,84	7791,75	0,00007	52,00	104,02	117,26	32,83
68	GS-M080	6844,88	7791,77	0,00002	52,01	27,28	29,04	52,30
69	GS-M081	6844,85	7791,75	0,00011	51,99	102,77	207,16	289,95
70	GS-M082	6844,84	7791,74	0,00006	52,01	59,54	343,66	92,51
71	GS-M083	6844,85	7791,75	0,00006	51,99	83,11	26,34	69,08
72	GS-M084	6844,84	7791,74	0,00006	52,00	109,06	26,81	308,07
73	GS-M085	6844,83	7791,73	0,00012	51,98	77,35	206,13	321,55
74	GS-M086	6844,82	7791,73	0,00004	51,99	45,65	340,48	334,67
75	GS-M088	6844,85	7791,75	0,00009	51,97	77,05	293,55	317,91
76	GS-M089	6844,83	7791,73	0,00005	51,99	114,28	160,81	62,67

Окончание табл. 1 [Table 1, ending]

№	КА [SC]	T (сек.) [sec.]	a (км) [km]	e	i (град.) [deg.]	ω (град.) [deg.]	Ω (град.) [deg.]	u (град.) [deg.]
77	GS-M090	6844,85	7791,75	0,00004	51,99	34,28	342,07	66,80
78	GS-M091	6844,84	7791,74	0,00010	52,00	65,87	251,61	341,49
79	GS-M092	6844,83	7791,74	0,00009	52,01	130,26	73,39	45,76
80	GS-M093	6844,83	7791,74	0,00001	51,98	131,63	250,03	228,46
81	GS-M094	6844,84	7791,74	0,00010	51,99	98,46	162,36	261,64
82	GS-M095	6844,84	7791,75	0,00009	51,98	55,55	296,76	304,54
83	GS-M096	6844,84	7791,74	0,00019	52,01	77,50	207,39	282,60
84	GS-M097	6844,82	7791,73	0,00007	52,00	60,18	254,19	299,92

Для построения портрета отклонений ДВУ целевых КА вводится понятие *базового целевого КА*, который располагается на некоторой фиктивной орбите со значением большой полуоси, минимальным на множестве значений этого параметра для всех целевых КА, и средними зна-

чениями других указанных выше орбитальных параметров (на множестве значений соответствующих параметров орбит целевых КА). Получающийся вид портрета отклонений ДВУ целевых КА относительно указанного базового КА представлен на рис. 1.

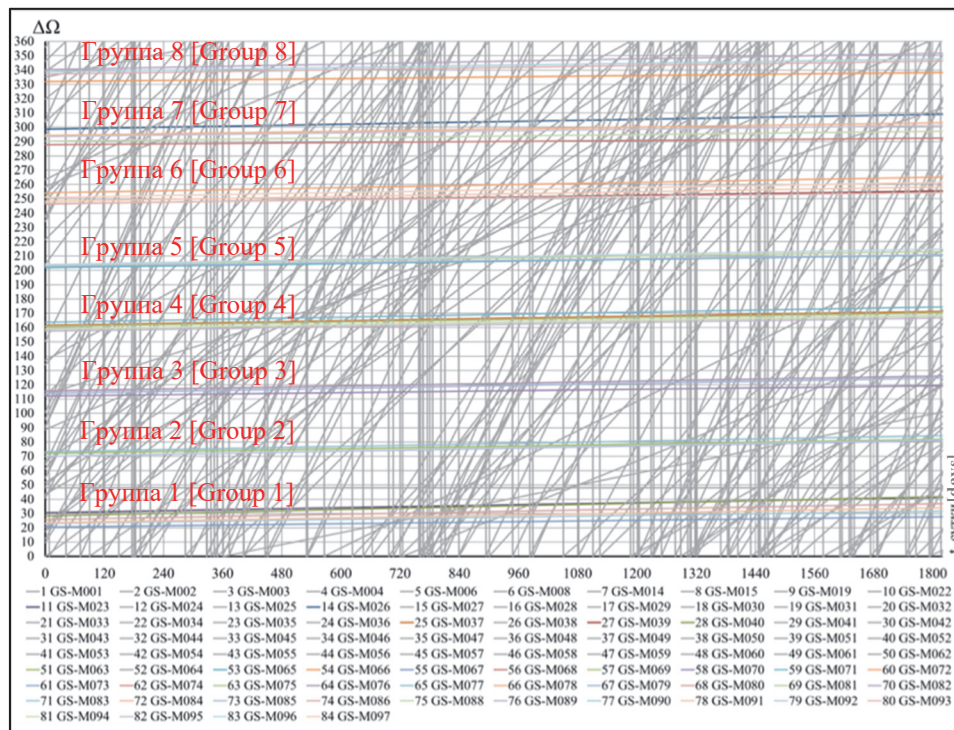


Рис. 1. Портрет отклонений ДВУ орбит целевых КА в отклонении от ДВУ орбиты базового целевого КА в течение пяти лет [Figure 1. SC orbit longitude of ascending node (LAN) deviation map from base SC orbit LAN value]

Из анализа рис. 1 можно заключить, что угол наклона представленных на нем линий (близких к линейной функции графиков зависимостей долготы восходящего узла от времени) для различных целевых КА зависит от большой полуоси, наклона и эксцентриситета орбит этих КА. Большое число квазипараллельных к оси абсцисс линий, сгруппированных на равном угловом расстоянии друг от друга на рис. 1, соответствуют линиям отклонений долгот восходящих узлов ор-

бит действующих КА, находящихся на своих рабочих орбитах. Остальные линии относятся к резервным целевым КА (серые пересекающиеся между собой линии на рис. 1), расположенным на орбитах со значительным отличием по высоте как от орбит действующих КА, так и между собой. Далее будут учитываться только действующие целевые КА, которым соответствуют квазипараллельные линии относительной эволюции долгот восходящих узлов.

2. Проектирование орбитального построения обслуживающей системы для действующих целевых КА

На рис. 1 линии отклонений долгот восходящих узлов орбит действующих целевых КА разделе-

ны на восемь групп, соответствующих восьми орбитальным плоскостям, разнесенным между собой на 45 градусов. Без учета маневров поддержания плоскости целевых КА в своих группах со временем расходятся вследствие прецессии линий узлов. Параметры орбит целевых КА приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры орбит действующих целевых КА Globalstar
[Table 2. Functional served Globalstar SC orbit parameters]

Группа 1 [Group 1]

№	КА [SC]	a (км) [km]	Ω (град.) [deg]
1	GS-M067	7791,74	23,74
2	GS-M083	7791,75	26,34
3	GS-M084	7791,74	26,81
4	GS-M080	7791,77	29,04
5	GS-M040	7793,40	31,61
6	GS-M023	7791,39	33,75

Группа 2 [Group 2]

№	КА [SC]	a (км) [km]	Ω (град.) [deg]
1	GS-M073	7791,75	73,24
2	GS-M092	7791,74	73,39
3	GS-M063	7791,73	75,31
4	GS-M077	7791,76	76,53

Группа 3 [Group 3]

№	КА [SC]	a (км) [km]	Ω (град.) [deg]
1	GS-M070	7791,74	115,46
2	GS-M079	7791,75	117,26
3	GS-M076	7791,78	118,82
4	GS-M074	7791,73	119,04

Группа 4 [Group 4]

№	КА [SC]	a (км) [km]	Ω (град.) [deg]
1	GS-M089	7791,73	160,81
2	GS-M075	7791,75	162,08
3	GS-M094	7791,74	162,36
4	GS-M069	7791,74	164,05
5	GS-M037	7791,61	164,87
6	GS-M071	7791,71	166,98

Группа 5 [Group 5]

№	КА [SC]	a (км) [km]	Ω (град.) [deg]
1	GS-M065	7791,74	205,18
2	GS-M085	7791,73	206,13
3	GS-M081	7791,75	207,16
4	GS-M096	7791,74	207,39

Группа 6 [Group 6]

№	КА [SC]	a (км) [km]	Ω (град.) [deg]
1	GS-M039	7792,07	249,81
2	GS-M093	7791,74	250,03
3	GS-M091	7791,74	251,61
4	GS-M097	7791,73	254,19
5	GS-M072	7791,71	257,50

Группа 4 [Group 4]

№	КА [SC]	a (км) [km]	Ω (град.) [deg]
1	GS-M068	7790,02	291,09
2	GS-M088	7791,75	293,55
3	GS-M095	7791,75	296,76
4	GS-M078	7791,74	297,53
5	GS-M026	7791,71	301,95

Группа 8 [Group 8]

№	КА [SC]	a (км) [km]	Ω (град.) [deg]
1	GS-M066	7791,73	335,22
2	GS-M086	7791,73	340,48
3	GS-M090	7791,75	342,07
4	GS-M082	7791,74	343,66

Постановка задачи проектирования орбитального построения ККТО для обслуживания действующих целевых КА на орбитах с близкими высотами имеет следующий вид.

Дано:

– $a_f, e_f, i_f, \omega_f, \Omega_f, u_f, f = \overline{1, K}$ – параметры орбит, действующих целевых КА;

– $K = 38$ – количество действующих целевых КА;

– $\Delta t = 5$ лет – продолжительность времени обслуживания;

– $\Delta V_{\text{зад м}} = 600$ м/с – максимальные запасы топлива орбитального модуля;

– $\Delta V_{\text{зад ст}} = 4800$ м/с – максимальные запасы топлива орбитальной станции;

– $M \leq 8$ – количество орбитальных модулей возвращаемого типа на каждой станции.

Каждый модуль может обслужить более одного целевого КА за один вылет.

Ограничения:

$$\Delta V_{jk} \leq \Delta V_{\text{зад м}} \quad (1)$$

$$\Delta V_j \leq \Delta V_{\text{зад ст}} \quad (2)$$

где $\Delta V_j = \sum_{k=1}^M \Delta V_{jk}$ – затраты суммарной характеристической скорости на перелеты всех орбитальных модулей, принадлежащих j -ой орбитальной станции; $\Delta V_{jk} = \sum_{l=1}^L \Delta V_{kl}$ – затраты суммарной характеристической скорости на перелеты к l -ым целевым КА k -го орбитального модуля, принадлежащего j -ой орбитальной станции.

Необходимо определить:

- $a_j, e_j, i_j, \omega_j, \Omega_j, u_j, j = \overline{1, S}$ – параметры орбит станций;
- S_{\min} – минимальное количество орбитальных станций.

Поскольку для действующих целевых КА проводятся маневры поддержания, то в этом случае величина относительной эволюции долготы восходящего узла орбит целевых КА не будет изменяться во времени (на заданном интервале времени Δt).

В сформулированной задаче требуется провести обслуживание всех целевых КА за заданное время Δt с минимальными затратами суммарной характеристической скорости. То есть необходимо выбрать количество и параметры орбит станций таким образом, чтобы обеспечить пересечение ее плоскости со всеми плоскостями целевых КА. При этом учитывается, что орбитальные модули возвращаются на борт орбитальной

станции после каждого вылета. Вернуться на станцию они должны не позднее истечения заданного времени Δt .

Для уменьшения затрат суммарной характеристической скорости перелетов модулей на орбиты целевых КА необходимо, чтобы линия относительной эволюции орбиты станции имела наименьший наклон к линиям относительной эволюции орбит целевых КА. Чем больше угол между линиями, тем большие затраты суммарной характеристической скорости требуются для перелета между орбитами. В данном примере наклон линий относительной эволюции отклонений долгот восходящих узлов орбит зависит только от большой полуоси (наклонение и эксцентриситет орбит целевых КА практически одинаковые). Для обеспечения пересечения в необходимые моменты времени на портрете требуется также выбрать долготу восходящего узла орбиты станции в момент времени, соответствующий начальному моменту времени на портрете $t=0$.

На рис. 2 показан портрет отклонений долгот восходящих узлов орбит целевых КА с добавлением линии относительной эволюции орбиты одной станции (ОС1) для обслуживания заданной группировки целевых КА в условиях заданных исходных данных со следующими большой полуоси и долготы восходящего узла ее орбиты: $a = 8089$ km, $\Omega = 23,74^\circ$. Остальные параметры орбиты ОС1 могут быть приняты равными параметрам орбиты базового целевого КА.

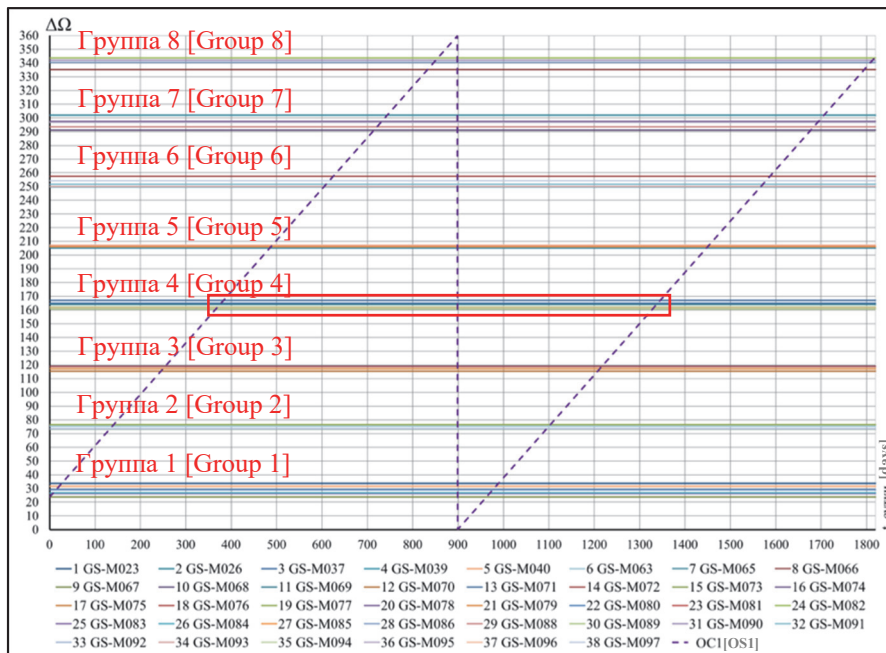


Рис. 2. Портрет отклонений ДВУ орбит целевых КА и ОС1 в течение 5 лет
 [Figure 2. SC and OS1 orbit LAN deviation map during 5 years]

Эффективность спроектированной орбиты станции и выполнение условий (1) и (2) могут быть проверены путем оценки затрат суммарной характеристической скорости перелетов модулей возвращаемого типа к каждому целевому КА в моменты пересечения их орбит и орбиты станции по формуле

$$\Delta V_{kl} = \frac{\Delta a}{a_0} V_0. \quad (3)$$

В результате расчета получаются следующие значения:

$$\Delta V_{kl} = \Delta V_k = 265,25 \text{ м/с} < \Delta V_{\text{зад м}},$$

$$\Delta V_j = \sum \Delta V_k = 10079,57 \text{ м/с} > \Delta V_{\text{зад ст}}.$$

Полученные затраты суммарной характеристической скорости каждого перелета ΔV_{kl} не превышают заданную величину по условию (1). Но сумма всех перелетов ΔV_j превышает заданные затраты для одной станции, нарушая условие (2). В связи с этим необходимо либо добавлять дополнительные станции, снижая их высоты, либо увеличивать продолжительность обслуживания. Но существует и третий вариант. За счет большого периода времени между двумя пересечениями плоскостей орбиты станции и целевых КА можно спланировать обслуживание всех целевых КА, помещая по одному орбитальному модулю в каждую группу целевых КА.

Таким образом, решение задачи планирования может быть сведено к следующей алгоритмической схеме. В момент первого пересечения плоскости орбиты станции с плоскостью орбиты первого целевого КА из группы орбитальный модуль отделяется от станции, выполняя первый, близкий к компланарному, маневр по перелету к ближайшему целевому КА группы (*внешний перелет*). Таким образом, орбитальный модуль попадает в так называемую *плоскость обслуживания*, где все целевые КА группы имеют близкие значения долгот восходящих узлов. Далее происходит некомпланарный облет всех целевых КА по наикратчайшему пути, определяемому долгой восходящего узла орбит (*внутренние перелеты*). В момент следующего пересечения плоскости обслуживания с плоскостью орбиты стан-

ции орбитальный модуль выполняет второй близкий к компланарному маневр по возврату на орбитальную станцию. Схема перелетов одного из орбитальных модулей приведена на рис. 3. По аналогичной схеме происходит обслуживание целевых КА в других группах.

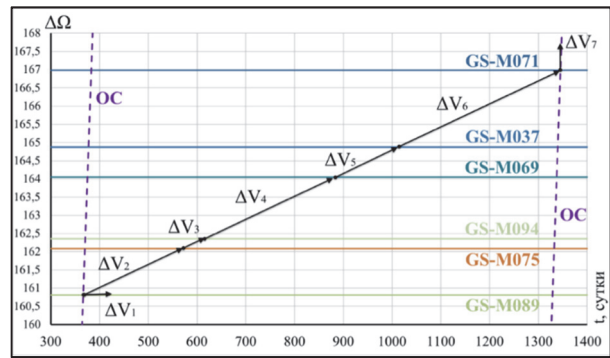


Рис. 3. Схема движения ОМ4 в плоскости четвертой группы целевых КА
 [Figure 3. Orbital module 4 (OM4) flight scheme in the orbit plane of the fourth group of SC]

На рисунке видно, что промежуток времени между двумя пересечениями плоскостей для каждой группы составляет порядка двух с половиной лет, следовательно, каждому орбитальному модулю необходимо уложиться именно в этот промежуток времени для выполнения всех внутренних перелетов.

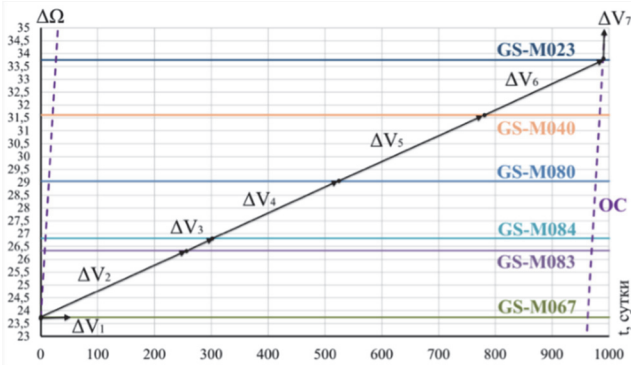
Оценить энергетику внешних перелетов в момент совпадения ДВУ орбиты станции и орбиты целевого КА можно с помощью формул для компланарного двухимпульсного перехода, затраты суммарной характеристической скорости которого для непересекающихся орбит оцениваются по формуле (3). Параметры импульсов внутренних перелетов определяются по формулам, описанным в [8]. Схемы перелетов орбитальных модулей и минимальные энергетические характеристики маневров, необходимых для обслуживания заданной группировки целевых КА, представлены в табл. 3.

Суммарная энергетика спроектированной орбитальной станции для обслуживания всех целевых КА за заданный промежуток времени приведена в табл. 4.

Таблица 3

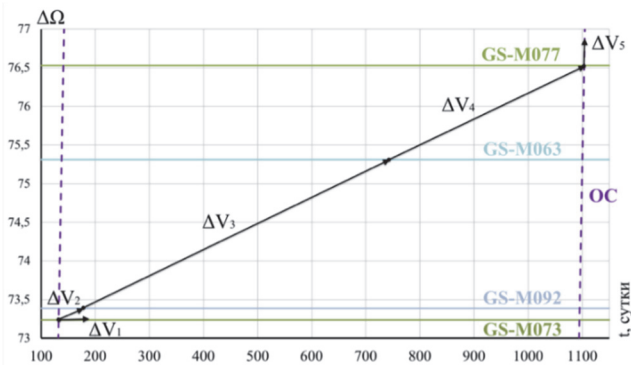
Схемы перелетов и затраты суммарной характеристической скорости (СХС) ОМ, необходимые для обслуживания целевых КА
[Table 3. OM flight schemes and total relative velocity for servicing SC]

а) Схема перелетов ОМ1 и затраты СХС для обслуживания целевых КА из группы 1
 [a) OM1 flight scheme and total relative velocity for servicing SC in group 1]



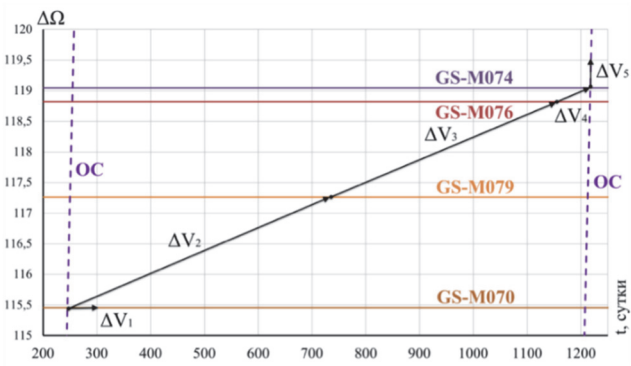
№	Орбита прилета [Arrival orbit]	Δa , км [km]	$\Delta\Omega$, град. [deg.]	ΔV , м/с [m/s]
1	GS-M067	297,27	0	132,63
2	GS-M083	0	2,6	7,08
3	GS-M084	0	0,47	9,80
4	GS-M080	0	2,23	6,52
5	GS-M040	0	2,57	7,13
6	GS-M023	0	2,14	7,42
7	OC1	297,27	0	132,63
				303,20

б) Схема перелетов ОМ2 и затраты СХС для обслуживания целевых КА из группы 2
 [b) OM2 flight scheme and total relative velocity for servicing SC in group 2]



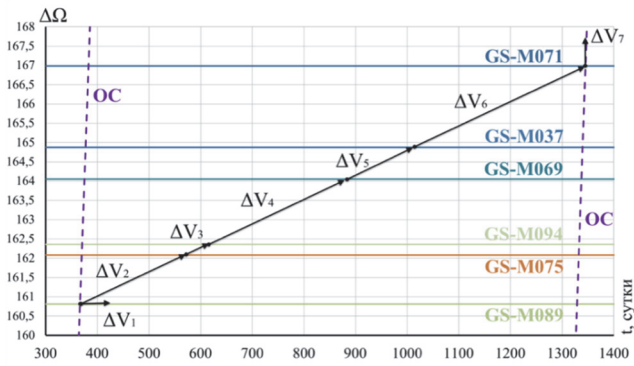
№	Орбита прилета [Arrival orbit]	Δa , км [km]	$\Delta\Omega$, град. [deg.]	ΔV , м/с [m/s]
1	GS-M073	297,27	0	132,63
2	GS-M092	0	0,15	11,65
3	GS-M063	0	1,92	2,37
4	GS-M077	0	1,22	2,21
5	OC	297,27	0	132,63
				281,48

в) Схема перелетов ОМ3 и затраты СХС для обслуживания целевых КА из группы 3
 [c) OM3 flight scheme and total relative velocity for servicing SC in group 3]



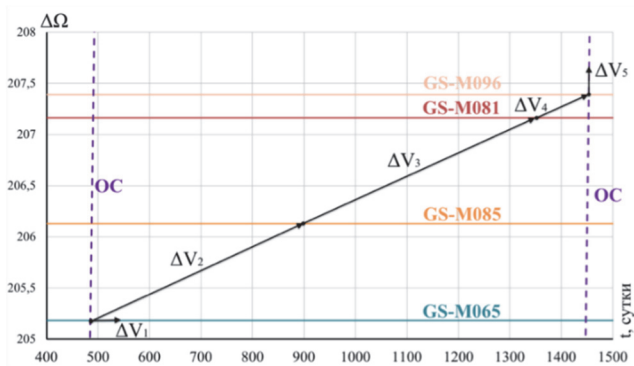
№	Орбита прилета [Arrival orbit]	Δa , км [km]	$\Delta\Omega$, град. [deg.]	ΔV , м/с [m/s]
1	GS-M070	297,27	0	132,63
2	GS-M079	0	1,8	2,30
3	GS-M076	0	1,56	2,82
4	GS-M074	0	0,22	14,30
5	OC	297,27	0	132,63
				284,67

г) Схема перелетов OM4 и затраты СХС для обслуживания целевых КА из группы 4
 [d) OM4 flight scheme and total relative velocity for servicing SC in Group 4]



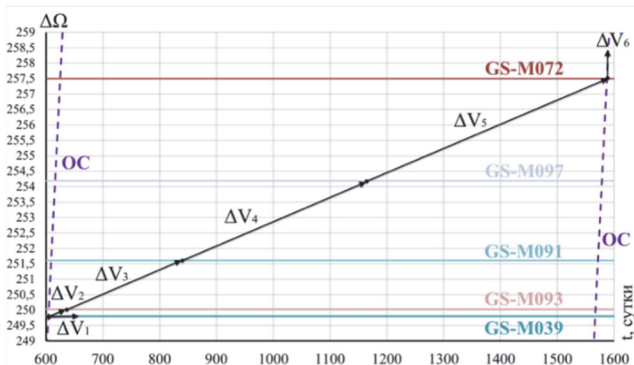
№	Орбита прилета [Arrival orbit]	Δa , км [km]	$\Delta\Omega$, град. [deg.]	ΔV , м/с [m/s]
1	GS-M089	297,27	0	132,63
2	GS-M075	0	1,27	4,22
3	GS-M094	0	0,28	22,57
4	GS-M069	0	1,69	4,15
5	GS-M037	0	0,82	7,85
6	GS-M071	0	2,11	4,73
7	OC	297,27	0	132,63
				308,77

д) Схема перелетов OM5 и затраты СХС для обслуживания целевых КА из группы 5
 [e) OM5 flight scheme and total relative velocity for servicing SC in group 5]



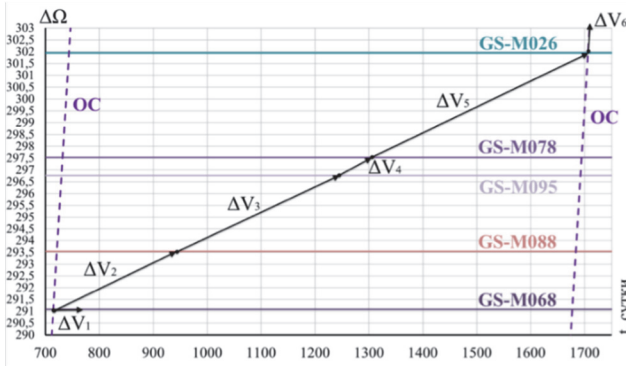
№	Орбита прилета [Arrival orbit]	Δa , км [km]	$\Delta\Omega$, град. [deg.]	ΔV , м/с [m/s]
1	GS-M065	297,27	0	132,63
2	GS-M085	0	0,95	2,30
3	GS-M081	0	1,03	1,74
4	GS-M096	0	0,23	9,16
5	OC	297,27	0	132,63
				278,45

е) Схема перелетов OM6 и затраты СХС для обслуживания целевых КА из группы 6
 [f) OM6 flight scheme and total relative velocity for servicing SC in group 6]



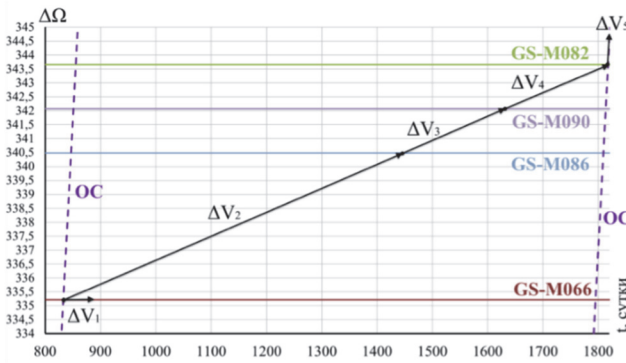
№	Орбита прилета [Arrival orbit]	Δa , км [km]	$\Delta\Omega$, град. [deg.]	ΔV , м/с [m/s]
1	GS-M039	297,27	0	132,63
2	GS-M093	0	0,22	23,80
3	GS-M091	0	1,58	5,82
4	GS-M097	0	2,58	5,73
5	GS-M072	0	3,31	5,34
6	OC	297,27	0	132,63
				305,94

ж) Схема перелетов OM7 и затраты СХС для обслуживания целевых КА из группы 7
 [g] OM7 flight scheme and total relative velocity for servicing SC in group 7



№	Орбита прилета [Arrival orbit]	Δa, км [km]	ΔΩ, град. [deg.]	ΔV, м/с [m/s]
1	GS-M068	297,27	0	132,63
2	GS-M088	0	2,46	6,87
3	GS-M095	0	3,21	8,50
4	GS-M078	0	0,77	13,96
5	GS-M026	0	4,42	7,53
6	OC	297,27	0	132,63
				302,11

з) Схема перелетов OM8 и затраты СХС для обслуживания целевых КА из группы 8
 [h] OM8 flight scheme and total relative velocity for servicing SC in group 8



№	Орбита прилета [Arrival orbit]	Δa, км [km]	ΔΩ, град. [deg.]	ΔV, м/с [m/s]
1	GS-M066	297,27	0	132,63
2	GS-M086	0	5,26	5,36
3	GS-M090	0	1,59	6,23
4	GS-M082	0	1,59	5,98
5	OC	297,27	0	132,63
				282,82

Таблица 4

Затраты суммарной характеристической скорости OC1
 [Table 4. OS1 total relative velocity]

OM [OM]	Целевые КА [Served SC]	ΔV, м/с [m/s]
OM1 [OM1]	Группа 1 [Group 1]	303,20
OM2 [OM2]	Группа 2 [Group 2]	281,48
OM3 [OM3]	Группа 3 [Group 3]	284,67
OM4 [OM4]	Группа 4 [Group 4]	308,77
OM5 [OM5]	Группа 5 [Group 5]	278,45
OM6 [OM6]	Группа 6 [Group 6]	305,94
OM7 [OM7]	Группа 7 [Group 7]	302,11
OM8 [OM8]	Группа 8 [Group 8]	282,82
		2347,45

Полученные в табл. 4 затраты суммарной характеристической скорости каждого орбитального модуля ΔV_{jk} по сравнению с затратами на этапе решения задачи проектирования увеличились. Вместе с тем они не превысили заданные затраты $\Delta V_{\text{зад м}}$, а эффективность каждого модуля возросла в несколько раз, поскольку он

обслуживает не один, а несколько целевых КА. Затраты суммарной характеристической скорости орбитальной станции ΔV_j уменьшились более чем в 5 раз. При этом они оказались почти в два раза меньше заданных значений $\Delta V_{\text{зад ст}}$.

Заключение

Приведенный алгоритм позволяет провести процедуру баллистического обоснования перспективного ККТО при обслуживании группировки целевых КА, находящихся на существенно отличающихся по долготе восходящего узла орбитах. Приведен пример определения оптимальной схемы перелетов орбитальных модулей в районе обслуживания целевых КА и оценки суммарной характеристической скорости для обеспечения перелетов модулей в окрестности обслуживаемых КА с учетом возвращения модулей на орбитальные станции.

Показано, что применение данной методики позволяет находить эффективные варианты орбитального построения ККТО, а также минимизировать затраты на создание и функционирование перспективного ККТО, по сравнению с применением известных методов, за счет оптимизации планирования обслуживания заданной группировки целевых КА с помощью орбитальных модулей и оптимизации осуществляемых модулями маневров при выполнении каждой операции технического обслуживания с учетом их возвращения на борт орбитальной станции.

Список литературы

1. *Fallin E.H.* Optimal intersatellite transfers for on-orbit servicing missions // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1975. Vol. 12. No. 9. Pp. 565–568.
2. *Da Fonseca I.M., Goes L.C.S., Seito N., Da Silva Duarte M.K., De Oliveira E.J.* Attitude dynamics and control of a spacecraft like a robotic manipulator when implementing on-orbit servicing // *Acta Astronautica*. 2017. Vol. 137. Pp. 490–497.
3. *Han C., Zhang S., Wang X.* On-orbit servicing of geosynchronous satellites based on low-thrust transfers considering perturbations // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. Pp. 658–675.
4. *Razoumny Yu.N., Razoumny V.Yu., Spencer D.B., Agrawal B., Kreisel J., Yasaka T. et al.* The concept of On-Orbit-Servicing for next generation space system

development and its key technologies // *Proceedings of the 68th International Astronautical Congress, IAC 2017*. 2017. Vol. 16. Pp. 10486–10499.

5. *Razoumny Yu., Razoumny V., Baranov A., Varatharajoo R., Kozlov P.* Method of optimization of the servicing space-based system orbits and detached units maneuvers parameters in the problem of on-orbit-servicing of the given multi-satellite space infrastructure // *Proceedings of the 67th International Astronautical Congress, IAC 2016*. International Astronautical Federation, IAF, 2016.

6. *Razoumny V.Yu., Baranov A.A.* Planing for on-orbit servicing of various satellite systems // *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2016. No. 4. Pp. 16–26.]

7. *Celestrak: Current NORAD Two-Line Element Sets*. URL: <http://celestrak.com/NORAD/elements/> (accessed: 26.09.2018).

8. *Razoumny V.Yu., Razoumny Yu.N., Baranov A.A., Malyshev V.V.* Method of energy estimation of interorbital transfers for LEO spacecraft on-orbit servicing // *Advances in the Astronautical Sciences*. Vol. 161. CA, USA: Univelt Inc., 2017. Pp. 701–709.

Для цитирования

Разумный В.Ю., Баранов А.А., Разумный Ю.Н. Проектирование орбитального построения космической системы для обслуживания космических аппаратов системы Globalstar // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 111–122. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-111-122>

Research paper

Satellite constellation design of on-orbit servicing space system for Globalstar satellites

Vladimir Yu. Razoumny, Yury N. Razoumny

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

Andrey A. Baranov

Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, 4 Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russian Federation
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: April 25, 2019

Revised: June 20, 2019

Accepted: June 28, 2019

The ballistic problem of on-orbit space serving system configuration design for active Globalstar satellites is considered. These satellites are moving in orbits with close altitudes and inclinations but with significant difference in longitude of ascending node (more than 10 degrees). The on-orbit space servicing system is a system of base orbital stations for servicing

Vladimir Yu. Razoumny – Associate Professor at the Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies at Academy of Engineering in RUDN University; razoumny-vyu@rudn.ru; ORCID iD: 0000-0001-6373-4608, eLIBRARY SPIN-code: 6860-2153.

Andrey A. Baranov – leading researcher at KIAM of RAS, Professor at the Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies at Academy of Engineering in RUDN University, PhD (Physics and Mathematics); ORCID iD: 0000-0003-1823-9354, eLIBRARY SPIN-code: 6606-3690.

Yury N. Razoumny – Director of Department of Mechanics and Mechatronics of Institute of Space Technologies, Director of Academy of Engineering of RUDN University, Doctor of Sciences (Techn.), Professor, full member of Russian Academy of Cosmonautics, full member of International Academy of Astronautics; ORCID iD: 0000-0003-1337-5672, eLIBRARY SPIN-code: 7704-4720.

Keywords:

space system; on-orbit servicing; base orbital station; detached orbital module; total relative velocity; LAN deviation map; aocomplanar orbits, complanar orbits; inter-orbit flights

the given array of the satellites using the detachable orbital modules. The noted aocomplanarity leads to high expenses of the total relative velocity (fuel) required for inter-orbit flights to servicing satellites. The article provides an example of solving the design problem basing on the developed methodology of optimal servicing planning using up-to-date algorithms of estimating energy costs of flights to servicing satellites, that significantly decrease flight fuel costs. The problem of configuration design of space servicing system as well as the problem of optimal servicing planning has been solved basing on the analyzing the deviation map of satellites and orbital stations longitudes of ascending node. It is shown that proposed method allows to define the necessary amount and orbit parameters of orbital stations, the amount of detached orbital modules and total relative velocity, needed to service the given group of spacecraft.

References

1. Fallin EH. Optimal intersatellite transfers for on-orbit servicing missions. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1975;12(9): 565–568.
2. Da Fonseca IM, Goes LCS, Seito N, Da Silva Duarte MK, De Oliveira EJ. Attitude dynamics and control of a spacecraft like a robotic manipulator when implementing on-orbit servicing. *Acta Astronautica*. 2017;137: 490–497.
3. Han C, Zhang S, Wang X. On-orbit servicing of geosynchronous satellites based on low-thrust transfers considering perturbations. *Acta Astronautica*. 2019;159: 658–675.
4. Razoumny YuN, Razoumny VYu, Spencer DB, Agrawal B, Kreisel J, Yasaka T, et al. The concept of On-Orbit-Servicing for next generation space system development and its key technologies. Proceedings of the 68th International Astronautical Congress, IAC 2017. 2017;16: 10486–10499.
5. Razoumny Yu, Razoumny V, Baranov A, Varatharajoo R, Kozlov P. Method of optimization of the servicing space-based system orbits and detached units maneuvers parameters in the problem of on-orbit-

servicing of the given multi-satellite space infrastructure. *Proceedings of the 67th International Astronautical Congress, IAC 2016*. International Astronautical Federation, IAF; 2016.

6. Razoumny VYu, Baranov AA. Planing for on-orbit servicing of various satellite systems. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2016;(4): 16–26.

7. *CelesTrak: Current NORAD Two-Line Element Sets*. Available from: <http://celestrak.com/NORAD/elements/> (Accessed 26 September 2018).

8. Razoumny VYu, Razoumny YuN, Baranov AA, Malyshev VV. Method of energy estimation of interorbital transfers for LEO spacecraft on-orbit servicing. *Advances in the Astronautical Sciences*. 2017;161: 701–709.

For citation

Razoumny VYu, Baranov AA, Razoumny YuN. Satellite constellation design of on-orbit servicing space system for Globalstar satellites. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 111–122. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-111-122>. (In Russ.)



Опыт и возможности применения космических систем дистанционного зондирования Земли для прогнозирования золоторудного оруденения на труднодоступных территориях на примере Полярного Урала

Ю.Н. Иванова

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

К.С. Иванов, М.К. Бондарева, В.А. Ермолаев

Главный испытательный космический центр Министерства обороны Российской Федерации имени Г.С. Титова, Российская Федерация, 141090, Московская область, Краснознаменск, ул. Октябрьская, 3

А.О. Жуков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119234, Москва, Университетский пр-т, 13

История статьи:

Поступила в редакцию: 05 марта 2019

Доработана: 16 мая 2019

Принята к публикации: 23 мая 2019

Ключевые слова:

дистанционное зондирование Земли; космический аппарат; дешифрирование; прогнозирование; золоторудное оруденение; Полярный Урал

В представленной статье рассматриваются вопросы применения отечественных и иностранных космических аппаратов (КА), а также их аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для поиска и прогнозирования золоторудного оруденения на труднодоступных территориях. Приведен пример решения этой задачи на перспективных территориях Полярного и Северного Урала. По материалам многозональной космической съемки аппаратом Landsat 7 выявлены крупные кольцевые, дуговые и радиальные структуры, определяющие позицию золоторудного оруденения Тоупул-Ханмейшорского (Новогодненское рудное поле, Полярный Урал) и Турьинско-Ауэрбаховского (Ауэрбаховское рудное поле, Северный Урал) рудных районов. Проведен сравнительный анализ существующих КА ДЗЗ, целевая информация о которых имеется в открытом доступе. Показано, что бортовая аппаратура, установленная на отечественных КА, и получаемая с ее помощью информация отвечают существующим требованиям, предъявляемым к ним для решения задачи поиска и прогнозирования оруденения. При этом возможности развернутой отечественной орбитальной группировки КА ДЗЗ превосходят возможности КА ДЗЗ Landsat 7. Рассматривается возможность получения геопространственной информации с использованием нового вида летательных аппаратов – псевдокосмических аппаратов (ПКА), обладающих рядом преимуществ как перед КА, так и перед беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в последнее время находит все большее применение

Иванова Юлия Николаевна – научный сотрудник лаборатории геологии рудных месторождений ИГЕМ РАН; доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН, кандидат геолого-минералогических наук; jnivanova@yandex.ru

Иванов Кирилл Сергеевич – начальник 101 научно-испытательной лаборатории, заместитель начальника 10 научно-испытательного отдела, кандидат технических наук.

Бондарева Марина Константиновна – ведущий научный сотрудник 11 научно-испытательного отдела, доктор технических наук, доцент.

Ермолаев Владимир Андреевич – старший научный сотрудник 101 научно-испытательной лаборатории.

Жуков Александр Олегович – ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штенберга, доктор технических наук, доцент.

© Иванова Ю.Н., Иванов К.С., Бондарева М.К., Ермолаев В.А., Жуков А.О., 2019

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



в практике геолого-съёмочных и поисковых работ. Информация, получаемая с использованием космических систем (КС) ДЗЗ, позволяет внести уточнения в существующие представления о геологическом строении исследуемой территории: помогает обнаружить ранее неустановленные, трудно диагностируемые или «скрытые» структуры в верхних этажах и на более глубоких уровнях земной коры, которые недоступны для общепринятых геолого-геофизических методов их распознавания [1]; дает возможность увидеть строение территорий в виде упорядоченной системы морфоструктур различного типа и ранга, что является важным для дальнейших структурно-геомор-

фологических и прогнозно-поисковых исследований, а также для разработки общих представлений по динамике металлогенических процессов; помогает получить информацию для труднодоступных и малоизученных северных площадей с мощным чехлом Mz-Kz отложений, суровым климатом и плохой транспортной инфраструктурой. При этом часто данные КС ДЗЗ не могут быть получены никакими другими способами.

Использование КС ДЗЗ в интересах геоинформационного обеспечения, как показывает мировой опыт [2], позволяет примерно в три раза сократить затраты времени и средств на поиск и освоение новых месторождений [3]. Высокопроизводительная вычислительная техника и многофункциональное специальное программное обеспечение (СПО) обработки, анализа и представления целевой информации КС ДЗЗ открывают качественно новые возможности по применению многоспектральных космических изображений при решении прогнозно-поисковых задач [2; 4–11].

На сегодняшний день в интересах укрепления национальной безопасности Российской Федерацией реализуется социально-экономическая политика, направленная на создание стратегических резервов минерально-сырьевых ресурсов, достаточных для гарантированного обеспечения потребностей экономики страны на долгосрочную перспективу¹. Обеспечить выполнение этой задачи возможно, в том числе благодаря поддержке исследований Крайнего Севера с целью его последующего освоения, а также совершенствования на основе современных достижений науки и техники методов поисковых и геологоразведочных работ, особенно с использованием материалов КС ДЗЗ.

Полярный Урал, входящий в арктическую территорию России, остается все еще слабо изученным из-за своей труднодоступности. На этой территории высока вероятность выявления месторождений благородных (Au, Ag), цветных (Cu, Mo, Zn, Pb) и особо дефицитных черных (Cr, Mn) металлов.

Данная площадь в ближайшем будущем может стать одним из новых золотодобывающих центров Российской Арктики, что актуально, так как в последние годы на мировом рынке отме-

чаются дефицит этого полезного ископаемого и, соответственно, высокий спрос на него, а также прогнозируется заметное увеличение цены на этот драгоценный металл.

В то же время освоение указанной территории затруднено рядом социально-экономических факторов: экстремальные природно-климатические условия, включая постоянный ледовый покров; очаговый характер промышленно-хозяйственного освоения территорий и низкая плотность населения; удаленность от основных промышленных центров, высокая ресурсоемкость и зависимость от своевременных поставок необходимых для деятельности и жизнеобеспечения средств².

Развитие методов ДЗЗ в геологии началось в 70–80-х годах XX в. с появлением многоспектральных изображений земной поверхности. На сегодняшний день использование данных космических съемок возрастает из-за существенного снижения стоимости и повышения оперативности (в масштабе времени близком к реальному) их получения, повышения их пространственного и спектрального разрешения, относительной простоты обнаружения и картирования приповерхностных объектов, которые слабо проявляются на поверхности и могут быть пропущены во время геолого-съемочных и поисковых работ.

В настоящее время космические аппараты (КА) со съемочными системами нового поколения позволяют получать снимки со сверхвысоким (например, до 41 см у КА GeoEye-1) пространственным разрешением, имеют обзорный режим наблюдения для обеспечения выполнения задач глобального мониторинга. КА ДЗЗ обладают преимуществами и особенностями по сравнению с другими видовыми средствами наблюдения, в том числе беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), снабженными оптическими и инфракрасными датчиками. Это связано с возможностью получения радиолокационной информации об объектах, которые невидимы в оптическом или инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, в том числе путем подповерхностного зондирования. Такие изображения могут быть получены в любое время суток и в различных метеоусловиях с высокой точной навигационной точностью.

¹ Указ Президента РФ от 31.12.2015 г. № 683 «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации». СЗ РФ. 2016. № 1. Ч. II. Ст. 212. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_191669

² Указ Президента РФ от 18.09.2008 № Пр-1969 «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_119442

Существенным преимуществом современных КС ДЗЗ перед БПЛА являются удаленное получение, обработка и анализ целевой информации. Относительно прост процесс заказа геопространственных данных, получаемых с использованием КС ДЗЗ, через соответствующих операторов средств ДЗЗ или их геоинформационные порталы.

В представленной статье рассматриваются вопросы применения и использования отечественных и иностранных КА и аппаратуры ДЗЗ для поиска и прогнозирования золоторудного оруденения на территории Полярного Урала.

Цель статьи – показать возможности использования КА для решения задач поиска и прогнозирования золоторудного оруденения, а также провести сравнительный анализ существующих КА ДЗЗ, целевая информация о которых имеется в открытом (необременительном) доступе.

1. Опыт применения КА ДЗЗ Landsat 7 для обработки КС

С помощью иностранного КА Landsat 7 (США) на примере Тоупугол-Ханмейшорского рудного района (Ямало-Ненецкий автономный округ) были проанализированы геолого-структурные особенности локализации и уточнена региональная позиция золоторудных месторождений и проявлений этой территории с учетом выявленных при космодешифрировании линеаментов и концентрических структур. Площадь района также была сопоставлена со старопромышленным Турьинско-Ауэрбаховским рудным районом (Северный Урал) для определения закономерностей размещения месторождений и рудопроявлений на изучаемых территориях [12].

Турьинско-Ауэрбаховский рудный район находится в восточной части Ауэрбаховского вулканоплутонического пояса (D_{1-2}). Этот пояс сформировался в режиме активной континентальной окраины в результате столкновения Тагильской островной дуги с Восточно-Уральским микроконтинентом [13]. В этом районе локализована одноименная вулканотектоническая депрессия, представленная грабен-синклиналью. Она сложена вулканогенно-осадочными и вулканогенными породами краснотурьинской свиты. В ее восточной части находится Ауэрбаховский интрузивный массив габбро-диорит-гранодиоритовой формации (D_{1-2}), комагматичный стратифицированным породам андезитовой формации и сложенный гранитами, гранодиоритами, кварцевыми диоритами, диори-

тами, а также подчиненными габбро и габбро-диоритами. Мелкие тела интрузивных пород имеют средний, реже кислый состав. На контакте карбонатных пород краснотурьинской свиты с Ауэрбаховской интрузией и ее сателлитами развиты многочисленные скарновые, магнетитовые и медномagnetитовые месторождения, характеризующиеся повышенной золотоносностью. В пределах рудного района известно крупное золоторудное месторождение Воронцовское и ряд рудопроявлений золото-сульфидно-кварцевого и золото-кварцевого типов [14].

Тоупугол-Ханмейшорский рудный район представляет собой также крупную вулканотектоническую депрессию и расположен в северо-восточном окончании Малоуральской структурно-формационной зоны (СФЗ) Тагило-Магнитогорской мегазоны на границе с Харбейским кристаллическим выступом. Малоуральская СФЗ сформировалась в среднем палеозое (S_2-C_1). Территория рудного района сложена разнообразными вулканогенно-осадочными породами базальт-андезитобазальтовой формации, характеризующимися переслаиванием обломочных вулканогенно-осадочных пород алевропелитовой, песчанистой и гравийной размерности с потоками базальтов и андезитобазальтов. Вулканогенно-осадочные породы прорываются разновозрастными образованиями собского, конгорского и малоханмейского интрузивных комплексов. В пределах рудного района известны два крупных объекта – месторождения Новогоднее-Монто (Fe-Au-скарновое) и Петропавловское (золото-порфировое), а также ряд рудопроявлений Fe-Au-скарнового и золото-кварцевого/порфирового типов [15].

В процессе дешифрирования была использована трехканальная мозаика, составленная из сцен Landsat 7/ETM+ при комбинации каналов 7–4–2 в растровом формате MrSID. Разрешение на местности ~30 м, площадь около 35 000 м². Дешифрирование проводилась в программе ArcGis. При обработке многоспектральных космических снимков Полярного Урала основное внимание уделялось выявлению дизъюнктивных нарушений (линейных, дуговых, кольцевых и радиально-концентрических). Наиболее четко линеаменты выражаются при каналах раstra RGB = 1:2:2 по резкой границе фототона и рисунку речной сети. Для реконструкции региональных палеовулканических сооружений применялся комплексный подход, основанный на дешифрировании космоснимков,

палеофациальном и морфоструктурном анализе и включающий снятие информативных структурных показателей рельефа и гидрографической сети с различных изображений земной поверхности; выявлялись главнейшие морфоструктурные элементы в региональном масштабе 1:50000; проводилось сопоставление с имеющимися геологическими картами и картографическим материалом. Кроме того, были использованы данные геофизических работ – карта расположений аномалий низкого сопротивления (НС) и вызванной поляризации (ВП) для Тоупугол-Ханмейшорского рудного района – с целью выявления связи дешифрируемых морфоструктур с глубинным строением территории.

В результате было установлено, что Тоупугол-Ханмейшорский рудный район характеризуется широким развитием линейных и кольцевых структур, отчетливо проявляющихся на космоснимках (рисунок, а). Исследуемая территория отвечает крупной кольцевой структуре 2-го порядка диаметром около 10 км. Месторождения Ауэрбаховского рудного поля также локализованы внутри крупной кольцевой структуры (диаметром 18–20 км) телескопированного строения [18] (рисунок, б), указывающего на многоэтапное ее развитие: полученная траектория фокусов демонстрирует, что в целом со временем положение последовательно формировавшихся очагов смещалось с юго-востока на северо-запад.

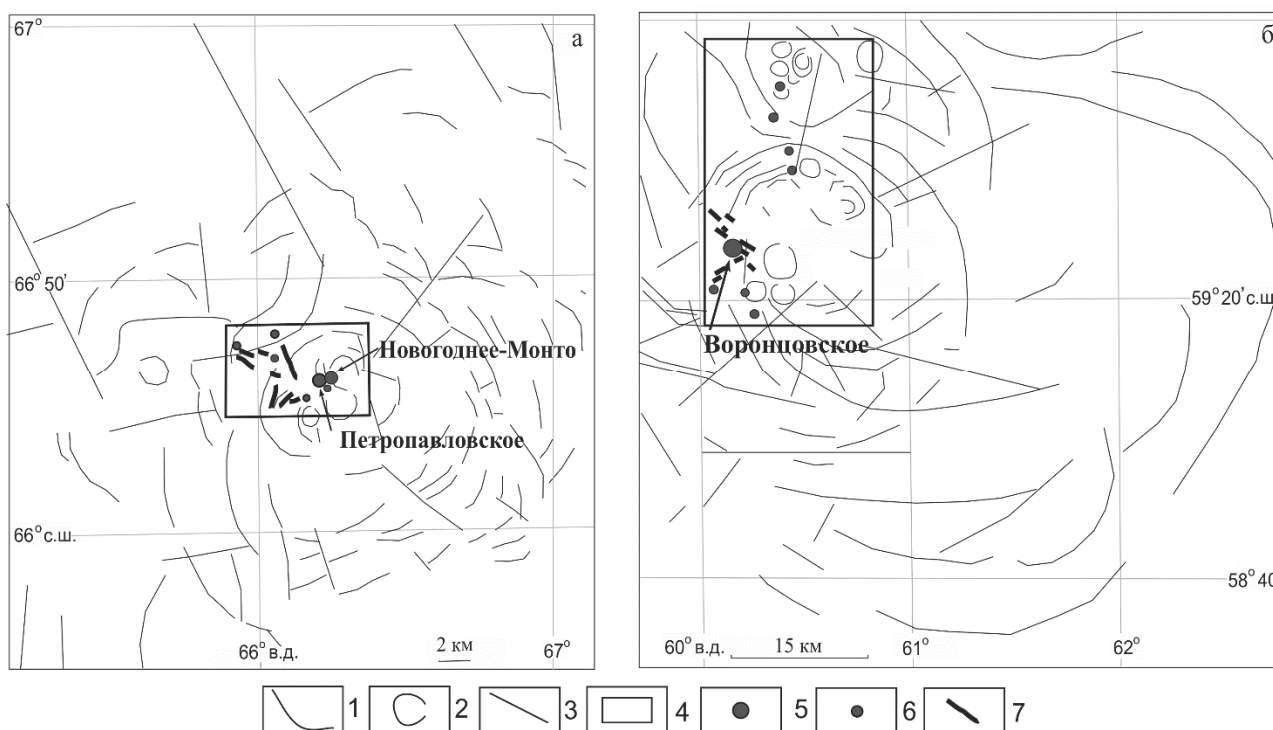


Рисунок. Дешифрирование космоснимков Тоупугол-Ханмейшорского (а) и Турьинско-Ауэрбаховского рудных районов (б):
1–3 – линеаменты: 1 – концентрические морфоструктуры 1 и 2-го порядков, 2 – морфоструктуры центрального типа 3-го порядка, 3 – радиальные морфоструктуры; 4 – контуры рудных районов; 5 – золоторудные месторождения;
6 – золотопроявления; 7 – внемасштабные субвулканические тела порфириновых диоритов

[Figure. Decoding of space imagery of the Touputugol-Khanmeyshorsky (a) and the Turyinsko-Auerbakhovskiy (b) ore districts:
1–3 – lineaments: 1 – concentric morphostructurals of the 1st and 2nd orders; 2 – morphostructurals of the central type, the 3rd order; 3 – radial morphostructurals; 4 – contours of ore districts; 5 – gold deposits; 6 – gold occurrences;
7 – out-of-scale subvolcanic bodies of porphyrite diorites]

Глубина магматических очагов для Новогодненской структуры составляла порядка 3,5 км, а Ауэрбаховской – около 20 км. Внутреннее строение кольцевых морфоструктур осложнялось пересечением концентрических и/или дуговых разломов радиальными разрывными нарушениями северо-

восточного и северо-западного простирания различных рангов, а также участками сосредоточения мелких кольцевых структур.

Основанный на космодешифрировании комплексный подход позволил выявить приуроченность зон золоторудной минерализации (место-

рождения и рудопроявления) севера Урала к сложно построенной системе кольцевых и радиальных структур. Представляется, что первостепенное значение в рудолокализации играют крупные кольцевые морфоструктуры, реконструированные в качестве корневых частей длительно развивавшихся стратовулканов с глубокофокусными (Ауэрбаховское рудное поле) и относительно мелкофокусными (Новогодненское рудное поле) магматическими очагами. Эти крупные кольцевые структуры осложнены, с одной стороны, радиально ориентированными линеаменами, а с другой – кольцевыми, дугообразными и овальными элементами более высоких порядков.

Таким образом, аналогичные задачи (например, дешифрирование, анализ геолого-структурных особенностей локализации, прогнозирование золоторудной минерализации) могут решаться с использованием не только иностранных КС ДЗЗ, но и отечественных, доступ к информации которых регулируется нормативно-правовыми актами Российской Федерации.

2. Возможности применения отечественных и зарубежных КС ДЗЗ

В настоящее время основными КС ДЗЗ являются системы оптико-электронного (ОЭН) и радиолокационного (РЛН) наблюдения и землеобзора. КС РЛН на сегодняшний день находятся на этапе формулирования задач, которые могут решаться ими в глобальной аэрокосмической сфере. К таким задачам относятся исследования природных ресурсов за счет глобального мониторинга земной поверхности и поиск залежей полезных ископаемых методом подповерхностного зондирования [16]. Основой же существующей системы ДЗЗ являются КС ОЭН.

Использование КА ДЗЗ для получения фото- и радиолокационных изображений подстилающей поверхности сопряжено с некоторыми особенностями: зависимостью периодичности наблюдения определенных районов от баллистического построения орбитальной группировки КА ДЗЗ, а также повышенными требованиями к массогабаритным характеристикам устанавливаемой на борт КА ДЗЗ аппаратуры. Причем как в части обособленного элемента аппаратуры (конкретный оптико- или радиоэлектронный комплекс), так и относительно набора этих элементов: ограниченная номенклатура оптико- или радиоэлектрон-

ный комплексов (ОЭК, РЭК), устанавливаемых на борт одного КА ДЗЗ.

Первая особенность в рамках задач, рассматриваемых в данной статье, нивелируется либо полным отсутствием требований к периодичности наблюдений и оперативности доставки целевой информации, либо несоизмеримо низкой динамикой изменений наблюдаемых объектов и относительно высокой периодичностью наблюдений, проводимых КА ДЗЗ. Вторая – напрямую влияет на разнообразие получаемой целевой информации с борта одного КА ДЗЗ, то есть за счет снижения массогабаритных характеристик каждого отдельного ОЭК или РЭК возможна установка дополнительных разновидностей целевой аппаратуры.

Например, КА Landsat 7 характеризуется небольшим разнообразием целевой аппаратуры и способен осуществлять 8-канальную мультиспектральную (гиперспектральную) съемку с полосой захвата 185 км, с разрешением от 30 до 60 м, а также панхроматическую съемку с аналогичной полосой захвата и разрешением до 15 м (аппаратура ЕТМ+).

К приближенным отечественным аналогам такой аппаратуры можно отнести:

- многозональное оптико-электронное сканирующее устройство (МСУ), разработанное Российским научно-исследовательским институтом космического приборостроения, обеспечивающее съемки в среднем и дальнем ИК-диапазоне, однако обладающее меньшей полосой захвата;

- МСУ среднего разрешения, разработанное Научно-исследовательским и технологическим институтом оптического материаловедения Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова», обладающее меньшей полосой захвата и более внушительными массогабаритными характеристиками, но при этом имеющее более высокое пространственное разрешение, чем аппаратура ЕТМ+.

- МСУ-100 и МСУ-50, совместно разработанные Институтом космических исследований РАН и АНО «Космос-НТ», характеризующиеся полосой захвата 480 и 940 км и пространственным разрешением 58 и 116 м соответственно. На борт КА устанавливаются МСУ-100 в двух экземплярах для увеличения полосы захвата аппаратуры КА ДЗЗ без потери качества снимков.

Был проведен сравнительный анализ технических характеристик различных съемочных устройств,

устанавливаемых на борт КА ДЗЗ (см. таблицу). Установлено, что снимки, полученные при помощи аппаратуры ETM+ (КА Landsat 7, запущен в 1999 г.), не отвечают современным требованиям по пространственному разрешению, несмотря на то, что для решения задач информационного обеспечения поиска месторождений полезных ископаемых его можно считать достаточным. Аппаратура современных отечественных КА ДЗЗ отвечает большинству существующих требований к качеству получаемых с борта снимков как в части диапазонов наблюдаемого спектра и пространственного разрешения, так и относительно точности их привязки.

В РФ целевое применение отечественных КС ДЗЗ осуществляется Научным центром оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ), являющимся оператором российских космических средств ДЗЗ. НЦ ОМЗ реализует полный цикл работ по

планированию съемки, сбору, стандартной и тематической обработки данных и передаче снимков конечному потребителю [14].

В настоящее время отечественная орбитальная группировка ДЗЗ состоит из 6 действующих КА («Электро-Л» № 2, «Метеор-М» № 2, «Ресурс-П» № 1, № 2, № 3, «Канопус-В» № 1), дополнительно может быть представлена архивная информация еще с 3 КА («Электро-Л» № 1, «Метеор-М» № 1, «Ресурс-ДК» № 1), в дальнейшем планируется увеличение числа действующих КА ДЗЗ за счет запусков КА «Метеор-М» и перспективных разрабатываемых КА «Электро-М», «Арктика-М» и «Метеор-МП». Проведение съемки или предоставление архивной информации осуществляется по заявкам от федеральных и региональных органов исполнительной власти в Госкорпорацию «Роскосмос» [4; 20].

Таблица

Сравнительный анализ технических характеристик отечественных и зарубежных съемочных устройств, устанавливаемых на борт КА ДЗЗ
[Table. Comparative analysis of the technical characteristics of domestic and foreign imaging devices that surveying onboard of SC of ERS]

Съемочные устройства [Surveying equipment]	Landsat 7	Ресурс-П [Resurs-P]				Метеор-М [Meteor-M]			Ресурс-ДК [Resurs-DK]	Канопус-В [Kanopus-V]
		MBA [MHDE]	ШМКВР [HDWMC]	ШМКСР [WRMCMR]	ГСА [HIE]	МСУ-МР [HIE-LR]	КМСС			
Параметры [Parameters]							МСУ-50 [HIE-50]	МСУ-100 [HIE-100, binary]		
Диапазон съемки, мкм [Shooting range, mm]	панхр. [panch.] 0,52–0,9 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,53–0,61 красный [red] 0,63–0,69 БИК [NIR] 0,78–0,9 1,55–1,75 2,09–2,35 СИК [MWIR] 10,4–12,5	панхр. [panch.] 0,52–0,9 синий [blue] 0,48–0,52 зеленый [green] 0,54–0,6 красный [red] 0,62–0,68 БИК [NIR] 0,72–0,8 0,8–0,9 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,43–0,9 синий [blue] 0,43–0,51 зеленый [green] 0,51–0,58 красный [red] 0,6–0,7 БИК [NIR] 0,7–0,9 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,43–0,90 синий [blue] 0,43–0,51 зеленый [green] 0,51–0,58 красный [red] 0,6–0,7 БИК [NIR] 0,7–0,9 СИК [MWIR] н/д	0,4–1,1 (96 каналов) [96 channels]	красный [red] 0,5–0,7 БИК [NIR] 0,7–1,1 1,6–1,8 СИК [MWIR] 3,5–4,1 10,5–11,1 11,5–12,5	зеле- ный [green] 0,37– 0,45 крас- ный [red] 0,45– 0,51 БИК [NIR] 0,58– 0,69 СИК [MWIR] н/д	зеле- ный [green] 0,535– 0,575 крас- ный [red] 0,63– 0,68 БИК [NIR] 0,76– 0,9 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,58–0,8 зеленый [green] 0,5–0,6 красный [red] 0,6–0,7 БИК [NIR] 0,7–0,8 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,58–0,86 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,51–0,6 красный [red] 0,61–0,69 БИК [NIR] 0,75–0,84 СИК [MWIR] н/д
Полоса захвата, км [Field of view, km]	185	185	441	97	25	2800	940	480 (960)	448	20
Пространственное разрешение, м [Spatial resolution, m]	15 (панхр.) [panch.] 30 (БИК) [NIR] 60 (СИК) [MWIR]	1 (панхр.) [panch.] 2–3 (MCP) 120 (MSM)	60 (панхр.) [panch.] 120 (MCP) 24 (MSM)	12 (панхр.) [panch.] 24 (MCP) 24 (MSM)	30 (MCP) [MSM]	около [approximately] 1000	120	60	1 (панхр.) [panch.] 2–3 (MCP) 12 (MSM)	2,5 (панхр.) [panch.] 12 (MCP) 12 (MSM)

Окончание табл. [Table ending]

Съемочные устройства [Surveying equipment]	Landsat 8	SPOT 6 и 7	Sentinel-2A	Sentinel-2B	Pléiades 1	Superview-1-5, Gaojing-1-5	KOMPSAT-3/3A
Диапазон съемки, мкм [Shooting range, mkm]	панхр. [panch.] 0,5–0,68 синий [blue] 0,45–0,51 зеленый [green] 0,53–0,59 красный [red] 0,63–0,67 БИК [NIR] 0,85–0,88 1,57–1,65 2,11–2,29 СИК [MWIR] 10,6–11,2 11,5–12,5	панхр. [panch.] 0,45–0,745 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,53–0,59 красный [red] 0,625–0,695 БИК [NIR] 0,76–0,89 СИК [MWIR] н/д	0,44–2,2 (12 каналов) [12 channels]	0,43–2,1 (12 каналов) [12 channels]	панхр. [panch.] 0,47–0,83 синий [blue] 0,43–0,55 зеленый [green] 0,5–0,62 красный [red] 0,590–0,710 БИК [NIR] 0,74–0,94 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,45–0,89 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,52–0,59 красный [red] 0,63–0,69 БИК [NIR] 0,77–0,89 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,45–0,9 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,52–0,60 красный [red] 0,63–0,69 БИК [NIR] 0,76–0,9 СИК [MWIR] н/д
Полоса захвата, км [Spatial resolution, km]	185	60	100	100	20	12	1
Пространственное разрешение, м [Spatial resolution, m]	15 (панхр.) [panch.] 30 (БИК) [NIR] 100 (СИК) [MWIR]	10–35	60 (панхр.) [panch.] 10 (MCP) [MSM]	60 (панхр.) [panch.] 10 (MCP) [MSM]	0,7 (панхр.) [panch.] 2,8 (MCP) [MSM]	0,5 (панхр.) [panch.] 2 (MCP) [MSM]	0,6 (панхр.) [panch.] 2/5 (MCP) [MSM]

Условные обозначения: БИК – ближний ИК-диапазон; СИК – средний ИК-диапазон; КМСС – комплекс многозональной спутниковой съемки; МВА – многозональная высокодетальная аппаратура; ШМКВР – широкозахватная мультиспектральная камера высокого разрешения; ШМКСР – широкозахватная мультиспектральная камера среднего разрешения; ГСА – гиперспектральная съемочная аппаратура; МСУ – многозональное съемочное устройство; МР – малое разрешение; MCP – мультиспектральный режим, панхр. – панхроматический

[Legend: NIR – near infrared range; MWIR – medium wave infrared range; MSIC – multispectral satellite imagery complex; MHDE – multi-zone highly detailed equipment; HDWMC – high definition wide-angle multispectral camera; WRMCMR – wide-resolution multispectral camera of medium resolution; HIE – hyperspectral imaging equipment; MID – multi-zone imaging device; LR – little resolution; MSM – multispectral mode; panch. – panchromatic]

Примечание: технические характеристики съемочных устройств приведены с сайтов [18; 19].

[Note: technical characteristics of the shooting devices available from [18; 19].]

Отдельно стоит упомянуть о разрабатываемых сегодня так называемых псевдокосмических аппаратах (ПКА). К ним относятся стратосферные летательные аппараты, функционирующие на высотах 18–30 км, имеющие самолетную компоновочную схему и способные осуществлять долговременное (до 5 лет) беспосадочное барражирование над участками земной поверхности. Основным источником энергии для ПКА являются аккумуляторные батареи, питаемые за счет фотоэлектронных элементов солнечных батарей. Они имеют ряд преимуществ как перед КА, так и пе-

ред традиционными БПЛА [21]. Основные достоинства перед КА – более высокое разрешение оптико-электронных систем, способность барражировать над заданными участком земной поверхности, существенно более низкая стоимость, связанная с отсутствием пусковых услуг космодромов. Главные достоинства перед БПЛА – большая зона обзора, существенно меньшие средства на обслуживание ПКА, более широкие возможности по реализации ретрансляционного способа управления. На сегодняшний день рынок потребителей услуг ПКА в российском сегменте не-

достаточно развит. Интервалы беспосадочного полета ПКА существенно зависят от широтности его географического применения, что связано с особенностями энергообеспечения ПКА.

Разработки и успешные летные испытания ПКА проводились в основном в США в рамках программ HALSOL и ERAST. Разработаны опытные образцы ПКА проектов Pathfinder (высота полета – до 22 500 м, масса полезной нагрузки – до 45 кг), Centurion (высота полета – до 24 000 м, масса полезной нагрузки – до 270 кг), Helios HP01 (высота полета до 29 600 м, масса полезной нагрузки – до 329 кг), серийные образцы ПКА Zephyr/Mercator (высота полета – до 19 000 м, масса полезной нагрузки – до 20 кг, возможность управления через КА-ретранслятор), Global Observer (высота полета – до 20 000 м, масса полезной нагрузки – до 453 кг).

Разрабатываемые иностранные ПКА специального назначения (созданы в рамках программы Vulture) позволяют вести непрерывное наблюдение за территориями на протяжении 5 лет беспосадочного полета на высотах до 27 000 м и с массой полезной нагрузки до 450 кг.

В РФ вопросами разработки ПКА занимается АО «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина» (ПКА серии «ЛА»). По некоторым оценкам, в нашей стране возможно создание ПКА, способного к беспосадочному полету до 18 месяцев на высотах до 25 000 м с массой полезной нагрузки до 200 кг [21].

Необходимо отметить, что использование ПКА для решения задач в Арктическом регионе (с учетом его климатических особенностей) может потребовать разработки отдельных научно-технических и конструкторских решений в части системы его энергообеспечения.

Заключение

Применение информации КС ДЗЗ для районов Полярного Урала, а также для аналогичных объектов на других труднодоступных территориях России со схожими геолого-структурными условиями локализации и составом слагающих их комплексов, даст возможность получить морфоструктурный план территории в виде упорядоченных систем (кольцевых, дуговых и радиальных структур, к которым приурочена золоторудная минерализация).

Это повысит уверенность в выборе перспективных площадей и поможет оптимизировать даль-

нейшие поисково-оценочные работы, предполетные и полетные этапы геологоразведочных работ. В целом это позволит уменьшить время проведения и стоимость прогнозно-поисковых работ, что немаловажно в экстремальных природно-климатических условиях Крайнего Севера.

Анализ существующих КС ДЗЗ показал, что бортовая аппаратура, установленная на отечественных КА, и получаемая с ее помощью информация отвечают существующим требованиям, предъявляемым к ним для решения задач поиска и прогнозирования оруденения. При этом возможности развернутой отечественной орбитальной группировки КА ДЗЗ превосходят возможности КА ДЗЗ Landsat 7, зарекомендовавшего себя при практическом применении для решения задач поиска и прогнозирования. Учитывая, что информация ДЗЗ иностранных КА находится в ограниченном доступе, целесообразен переход к отечественному оператору ДЗЗ для обеспечения беспрепятственного доступа к геопространственной информации. В перспективе может рассматриваться возможность получения геопространственной информации с использованием ПКА, что должно учитываться заказчиком и разработчиком на стадиях проектирования их специальной аппаратуры.

Список литературы

1. *Киренский А.С., Корчагин В.П., Кузьменко Р.Г.* Опыт тектонического районирования с использованием космических снимков // *Методы дистанционных исследований для решения природоведческих задач*. 1986. С. 54–62.
2. *Graham G.E., Kokaly R.F., Kelley K.D. et al.* Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the Eastern Alaska Range // *Economic Geology*. 2018. Vol. 113 (2). Pp. 489–510. doi:10.5382/econgeo.2018.4559
3. *Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И. и др.* Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014. 736 с.
4. *Nezampour M.H., Rassa I.* Using remote sensing technology for the determination of mineralization in the Kal-e-Kafi porphyritic deposit, Anarak, Iran // *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. 2005. Pp. 565–567. doi.org/10.1007/3-540-27946-6_145
5. *Зверев А.Т., Малинников В.А., Ареллано-Баэса А.* Прогноз месторождений рудных полезных ископаемых на территории Чили на основе линейного анализа космических изображений // *Известия высших учебных*

заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 6. С. 62–69.

6. *Tommaso I.D., Rubinstein N.* Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geology Reviews*. 2007. Vol. 32. Issue 1–2. Pp. 275–290. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004

7. *Zhang X., Pazner M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2007. Vol. 62. Issue 4. Pp. 271–282. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.04.004

8. *Миловский Г.А., Рудаков В.В., Лебедев В.В. и др.* Применение космической съемки для прогноза золоторудения в зонах глубинных разломов на Северо-Востоке России // *Исследование Земли из космоса*. 2010. № 3. С. 30–34.

9. *Зверев А.Т., Гаврилова В.В.* Разработка теории и методов оценки и прогноза состояния природных ресурсов с использованием космических снимков // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2012. № 5. С. 44–47. doi.org/10.24057/2414-9179-2017-3-23-178-194

10. *Vural A., Corumluoglu Ö., Asri I.* Remote sensing technique for capturing and exploration of mineral deposit sites in Gumushane metallogenic province, NE Turkey // *Journal Geology Society of India*. 2017. Vol. 90. Issue 5. Pp. 628–633. doi.org/10.1007/s12594-017-0762-0

11. *Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Asghar Calagari A.* Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran // *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. Vol. 11. Pp. 1–19. doi.org/10.1007/s12517-018-3822-x

12. *Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И., Викентьев И.В.* Геологическая позиция и структурный контроль оруденения Тоупугол-Ханмейшорского района (Полярный Урал) по результатам дистанционного зондирования // *Исследование Земли из космоса*. 2019 (в печати).

13. *Язева Р.Г., Бочкарев В.В.* Войкарский вулканоплутонический пояс (Полярный Урал). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 156 с.

14. *Викентьев И.В., Мурзин В.В., Тюкова Е.Э. и др.* Воронцовское золоторудное месторождение. Геология,

формы золота, генезис. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2016. 204 с.

15. *Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др.* Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // *Геология рудных месторождений*. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.

16. *Выхристенко Р.И.* Палеовулканические постройки Турьинско-Ауэрбаховского и Валенторского рудных районов и связанные с ними месторождения золота и меди // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2014. № 4. С. 122–128.

17. *Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Туррук В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

18. Сайт Научного центра оперативного мониторинга Земли. URL: http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites

19. Характеристики съемочных устройств. URL: <https://eos.com>

20. *Емельянова Ю.Г., Хачумов В.М., Ватутин В.М. и др.* Анализ баз данных решения задач мониторинга Арктической зоны // *Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: сборник трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции, 1–3 июня 2016 г. М.: АО «РКС», 2016.*

21. *Клименко Н.Н.* Псевдокосмические аппараты для длительного непрерывного наблюдения локальных районов // *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*. 2017. № 4 (38). С. 122–134.

Для цитирования

Иванова Ю.Н., Иванов К.С., Бондарева М.К., Ермолаев В.А., Жуков А.О. Опыт и возможности применения космических систем дистанционного зондирования Земли для прогнозирования золоторудного оруденения на труднодоступных территориях на примере Полярного Урала // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 2. С. 123–133. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-123-133>

Experience and opportunities of space systems applications of Earth remote sensing to prediction gold mineralization on difficult to approach areas on the example of the Polar Urals

Julia N. Ivanova

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of Russian Academy of Sciences,
35 Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russian Federation
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Kirill S. Ivanov, Marina K. Bondareva, Vladimir A. Ermolaev

Titov Main Test and Space Systems Control Centre, 3 Otkryabskaya St., Krasnoznamensk, 141090, Russian Federation

Alexander O. Zhukov

Lomonosov Moscow State University, 13 Universitetsky Ave., Moscow, 119234, Russian Federation

Article history:

Received: March 05, 2019

Revised: May 16, 2019

Accepted: May 23, 2019

Keywords:

Earth remote sensing; spacecraft; spectrozonal satellite imagery; prediction; gold mineralization; the Polar Urals

The questions of the using of domestic and foreign spacecraft (SC), as well as Earth remote sensing (ERS) equipment for search and predication of gold mineralization on the example of the promising and difficult to approach areas of the Polar and the Northern Urals are discussed in the article. The solution of this problem is showed on the example of the prospective areas of the Arctic and the Northern Urals based on analysis of Landsat 7 multispectral images. Hidden structures (arc, annular, and radial) were detected with help of analyses of Landsat 7 imagery. Hidden structures determine the position of gold mineralization of the Toupugol-Hanmeyshorskogo (the Novogodnenskoe ore field, the Polar Urals) and the Turinsko-Auerbachovskogo (the Auerbachovskoe ore field, the Northern Urals) ore regions. The decision of this problem is given on the example of the promising territory of the Polar Urals with the use foreign SC the Landsat 7. Comparative analysis of the existing SC of ERS has been carried out, this target information has in the public domain. The onboard equipment installed on domestic spacecraft and the information obtained with use onboard equipment meets the existing requirements. These requirements are placed to onboard equipment to solve the problem of search and predication mineralization. At the same time, the capabilities of the deployed domestic orbital grouping of SC of ERS transcend the capabilities of SC of ERS the Landsat 7. Opportunity of obtaining geospatial information with the use of pseudospacecrafts is being considered. These have several advantages over SC and unmanned aerial vehicles.

References

1. Kirensky AS, Korchagin VP, Kuzmenko RG. Opyt tektonicheskogo rayonirovaniya s ispol'zovaniyem kosmicheskikh snimkov [Experience of tectonic zoning with the use of satellite imagery]. *Metody distantsionnykh issledovaniy dlya resheniya prirodovedcheskikh zadach*. 1986: 54–62. (In Russ.)
2. Graham GE, Kokaly RF, Kelley KD, et al. Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in

Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the Eastern Alaska Range. *Economic Geology*. 2018;11(2): 489–510.

3. Menshikov VA, Perminov AN, Rembeza AI, et al. Osnovy analiza i proyektirovaniya kosmicheskikh sistem monitoringa i prognozirovaniya prirodnykh i tekhnogenykh katastrof [Base of analysis and design of space systems for monitoring and predication natural and man-made disasters]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2014. (In Russ.)

4. Nezampour MH, Rassa I. Using remote sensing technology for the determination of mineralization in the Kal-e-Kafi porphyritic deposit, Anarak, Iran. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. 2005: 565–567. Available from: doi.org/10.1007/3-540-27946-6_145

5. Zverev AT, Malinnikov VA, Arellano-Baeza A. Prognoz mestorozhdeniy rudnykh poleznykh iskopyemykh na territorii Chili na osnove lineamentnogo analiza

Julia N. Ivanova – researcher in Laboratory of Geology of Ore Deposits of IGEM RAS; Associate Professor of the Department of Geology, Mining and Oil and Gas Industry of Academy of Engineering, PhD; jnivanova@yandex.ru

Kirill S. Ivanov – head of the 101 Scientific Testing Laboratory, Deputy Head of the 10 Scientific Testing Department, PhD.

Marina K. Bondareva – leading researcher of the 11th Scientific Testing Department, Doctor of Sciences, Associate Professor.

Vladimir A. Ermolaev – senior researcher, 101 Research Laboratory.

Alexander O. Zhukov – leading researcher of Sternberg Astronomical Institute, Doctor of Sciences, Associate Professor.

kosmicheskikh izobrazheniy [Forecast of mineral deposits in Chile based on lineament analysis of satellite images]. *Izvestiya vishchikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geodesy and aerophotosurveying]*. 2005; 6: 62–69. (In Russ.)

6. Tommaso ID, Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiermillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*. 2007;32(1–2): 275–290.

7. Zhang X, Pazner M, Duke N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2007;62(4): 271–282.

8. Milovsky GA, Rudakov VV, Lebedev VV, Koryuk MK, Shaibakova LA, Filippov DV. Primeneniye kosmicheskoy s"yemki dlya prognoza zolotogo orudneniya v zonakh glubinnykh razlomov na Severo-Vostoke Rossii [Application of space borne survey for forecasting of gold mineralization in deep fault zones in the North-East of Russia]. *Earth observation and remote sensing*. 2010;3: 30–34. (In Russ.)

9. Zverev AT, Gavrilova VV. Razrabotka teorii i metodov otsenki i prognoza sostoyaniya prirodnykh resursov s ispol'zovaniyem kosmicheskikh snimkov [Development of the theory and methods for assessing and prediction of natural resources state with use of satellite imagery]. *Izvestiya vishchikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geodesy and aerophotosurveying]*. 2012;5: 44–47. (In Russ.)

10. Vural A, Corumluoglu Ö, Asri I. Remote sensing technique for capturing and exploration of mineral deposit sites in Gumushane metallogenic province, NE Turkey. *Journal Geology Society of India*. 2017;90(5): 628–633. Available from: doi.org/10.1007/s12594-017-0762-0

11. Yousefi T, Aliyari F, Abedini A, Asghar Calagari A. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2018;11: 1–19.

12. Ivanova JN, Vyhristenko RI, Vikentyev IV. Geologicheskaya pozitsiya i strukturnyy kontrol' orudneniya Toupugol-Khanmeyshorskogo rayona (Polyarnyy Ural) po rezul'tatam distantsionnogo zondirovaniya [Geological position and structural control of ore mineralization of the Toupugol-Khanmeyshorsky district (the Polar Urals) as a result of remote sensing]. *Earth Observation and Remote Sensing*. 2019. (In press.) (In Russ.)

13. Yazeva RG, Bochkarev VV. *Voykarskiy vulkano-plutonicheskiy poyas (Polyarnyy Ural) [Voikarskiy volcano-plutonic belt (the Polar Urals)]*. Sverdlovsk: USC of USSR Academy of Sciences; 1984. (In Russ.)

14. Vikentiev IV, Murzin VV, Tyukova EE, et al. Vorontsovskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye. Geo-

logiya, formy zolota, genezis [*Vorontsovskoe gold deposit. Geology, forms of gold, genesis*]. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publ.; 2016. (In Russ.)

15. Vikentyev IV, Ivanova YN, Tyukova EE, et al. Zoloto-porfirovoye Petropavlovskoye mestorozhdeniye (Polyarnyy Ural): geologicheskaya pozitsiya, mineralogiya i usloviya obrazovaniya [Porphyry-Style Petropavlovskoe Gold Deposit, the Polar Urals: Geological Position, Mineralogy, and Formation Conditions]. *Geology of Ore Deposits*. 2017;59(6): 482–520. (In Russ.)

16. Vyhristenko RI. Paleovolcanicheskiye postroyki Tur'insko-Auerbakhovskogo i Valentorskogo rudnykh rayonov i svyazannyye s nimi mestorozhdeniya zolota i medi [Paleovolcanic structures of the Turiyinsko-Auerbakhovskiy and the Valentorskiy ore districts and the gold and copper deposits connected with them]. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering researches*. 2014;4: 122–128. (In Russ.)

17. Verba VS. (ed.) *Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Radiolocation system of ground view of space-based ground]*. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2010. (In Russ.)

18. The scientific center for operational Earth monitoring. Available from: http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites

19. Characteristic of the shooting devices. Available from: <https://eos.com>

20. Yemelyanova JG, Khachumov VM, Vatutin VM, et al. Analiz baz dannykh resheniya zadach monitoringa Arkticheskoy zony [Analysis of databases for solving problems of monitoring the Arctic zone]. *Aktual'nyye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroyeniya i informatsionnykh tekhnologiy: Sbornik trudov VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 1–3 iyunya 2016 [Actual problems of rocket and space instrument engineering and information technologies: Collection of works of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference, June 1–3, 2016]*. Moscow: AO "RKS"; 2016. (In Russ.)

21. Klimenko NN. Pseudokosmicheskiye apparaty dlya dlitel'nogo nepreryvnogo nablyudeniya lokal'nykh rayonov [Pseudo-spacecrafts for long-term continuous observation of local areas]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*. 2017;4(38): 122–134. (In Russ.)

For citation

Ivanova JuN, Ivanov KS, Bondareva MK, Ermolaev VA, Zhukov AO. Experience and opportunities of space systems applications of Earth remote sensing to prediction gold mineralization on difficult to approach areas on the example of the Polar Urals. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 123–133. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-123-133>. (In Russ.)



МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-134-139

УДК 678.606.55

Научная статья

Разработка методики расчета круговых прерывистых сварных швов на кручение

Ю.В. Белоусов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

И.А. Клеймюк

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

С.В. Страшнов

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 12 марта 2019

Доработана: 20 мая 2019

Принята к публикации: 28 мая 2019

Ключевые слова:

сварные швы; наибольшие касательные напряжения; полярный момент сопротивления; повернутое опасное сечение

Основным критерием работоспособности швов сварных соединений является прочность. Наименее прочными являются угловые швы, используемые для выполнения различных видов сварных соединений. В литературе достаточно подробно рассмотрены методы расчета на прочность сварных соединений сплошными швами. Методы расчета соединений прерывистыми швами отсутствуют. При этом наибольшие трудности представляет расчет соединений с помощью круговых прерывистых швов, которые довольно часто выполняются в сварных барабанах и шкивах. Они работают на кручение. Поэтому разработка методики расчета круговых прерывистых швов на кручение имеет достаточно важное значение. Касательные напряжения в сварных угловых швах от крутящего момента определялись в зависимости от величины полярного момента сопротивления его опасного сечения. При определении полярного момента сопротивления опасного сечения кругового прерывистого шва оно представлялось совокупностью участков в виде сектора кругового кольца. Разработана методика расчета полярного момента сопротивления повернутого опасного сечения кругового прерывистого сварного шва, которая учитывает относительную длину участков шва и их количество, а также методика точного и приближенного расчета касательных напряжений в данном сварном шве.

Введение

Сварные соединения являются наиболее распространенным видом неразъемных соединений. Их широко применяют в строительстве и машиностроении. Достаточно подробно разработана ме-

тодика расчета на прочность стыковых сварных швов, которые являются наиболее рациональными, так как максимально приближают составные детали по форме и прочности к целому изделию [1; 2]. Они образуются при полной проварке стыка торцов соединяемых деталей с помощью дуговой или контактной электросварки, а также при сварке трением. Однако большое количество сварных соединений образуется с помощью угловых швов. Угловые швы образуются при сваривании деталей нахлесточных, тавровых и угловых соединений, кромки деталей которых не имеют скосов. Это упрощает их изготовление [3].

Белоусов Юрий Вениаминович – доцент кафедры основ конструирования машин МГТУ имени Н.Э. Баумана, доцент департамента строительства Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук; belou.80@mail.ru

Клеймюк Иван Александрович – студент механико-технологического факультета МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Страшнов Станислав Викторович – старший преподаватель департамента строительства Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук.

© Белоусов Ю.В., Клеймюк И.А., Страшнов С.В., 2019

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

Наиболее часто применяют нормальные угловые швы, имеющие в поперечном сечении прямоугольный треугольник с соотношением катетов 1:1, как более простые в изготовлении. Разрушение углового шва происходит по наименьшему сечению по плоскости, проходящей через биссектрису прямого угла. Размер шва в этом сечении βk , где k – катет шва. Второй размер – длина шва $l_{ш}$. При многопроходной автоматической и полуавтоматической сварке, а также при ручной сварке принимают $\beta = 0,7$, считая шов равнобедренным прямоугольным треугольником.

Расчет угловых швов условно проводят по касательным напряжениям, распределенным по опасному сечению. Поверхность разрушения швов поворачивают на плоскость стыка соединяемых деталей. Суммарное касательное напряжение в опасном сечении определяют геометрическим сложением составляющих напряжений.

1. Определение полярного момента сопротивления опасного сечения кругового прерывистого сварного шва

В самом общем случае сварное соединение может работать на изгиб, сдвиг и кручение. Наибольшие касательные напряжения от изгибающего момента M

$$\tau_{M_{\max}} = M/W,$$

где W – момент сопротивления повернутого опасного сечения относительно оси изгиба.

Наибольшие касательные напряжения от крутящего момента T

$$\tau_{T_{\max}} = \frac{T}{W_{\rho}}, \quad (1)$$

где W_{ρ} – полярный момент сопротивления повернутого опасного сечения.

Таким образом, касательные напряжения углового шва от изгибающего и крутящего моментов определяются величинами соответственно осевого и полярного моментов сопротивления повернутого опасного сечения.

Осейвой W , а также полярный W_{ρ} моменты сопротивления опасного сечения сплошного шва могут быть достаточно просто определены по известным формулам сопротивления материалов для сечения шва в форме круглого и прямоугольного кольца и двух прямоугольников [4; 5]. Осевой W , а также полярный W_{ρ} моменты сопротивления опасного сечения прерывистого шва по известным

формулам сопротивления материалов могут быть определены только для сечения шва в форме прямоугольного кольца и двух прямоугольников [6]. Касательные напряжения от изгибающего момента и поперечной силы в круговом прерывистом шве достаточно подробно исследованы в работе [6]. Расчетные зависимости для определения касательных напряжений в опасном сечении прерывистого кругового шва от крутящего момента в литературе отсутствуют.

Круговые прерывистые швы довольно часто выполняются в сварных барабанах и шкивах. Они работают в основном на кручение. Поэтому расчет круговых прерывистых швов на кручение имеет достаточно важное значение, что в итоге позволит сформулировать необходимые требования к размерам и качеству данных швов.

Для определения полярного момента сопротивления опасного сечения шва поверхность его разрушения, проходящую через биссектрису прямого угла, повернем на плоскость стыка соединяемых деталей. Рассмотрим участок шва в виде сектора кругового кольца (рис. 1).

Для него [7]

$$y_1 = \frac{d-\delta}{2} \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} - \cos \alpha \right) + \frac{\delta \cos \alpha}{2}, \quad (2)$$

$$J_x = \frac{\delta(d-\delta)^3}{8} \left[\alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} - \frac{2\sin^2 \alpha}{\alpha} \right], \quad (3)$$

$$J_y = \frac{\delta(d-\delta)^3}{8} \left(\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right), \quad (4)$$

где J_x и J_y – осевые моменты инерции сечения относительно его главных осей x и y .

Тогда полярный момент инерции данного элемента относительно полюса – точки O

$$J_{\rho} = J_x + J_y + d\delta \left(\frac{d}{2} - y_1 \right)^2. \quad (5)$$

Подставив в (5) выражения (2), (3) и (4), а также учитывая, что d много больше δ и y_1 , получим

$$J_{\rho} = \frac{\delta d^3}{4} \left(2\alpha - \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha} \right). \quad (6)$$

Полярный момент инерции всего прерывистого шва, содержащего n участков:

$$J_{\rho\Sigma} = \frac{\delta d^3 n}{4} \left(2\alpha - \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha} \right). \quad (7)$$

Полярный момент сопротивления такого шва:

$$W_{\rho\Sigma} = \frac{J_{\rho\Sigma}}{\frac{d}{2}} = \frac{\delta d^2 n}{2} \left(2\alpha - \frac{\sin^2 \alpha}{\alpha} \right). \quad (8)$$

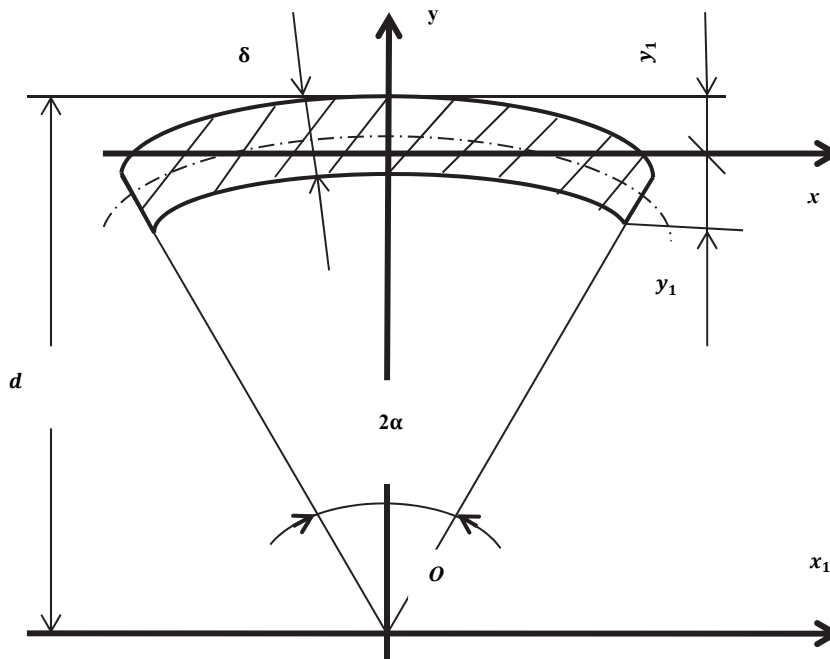


Рис. 1. Участок прерывистого сварного шва
[Figure 1. Intermittent weld area]

Обозначим $k = l_{ш}/l_{пр}$ – относительная длина участка шва. Здесь $l_{ш}$ – длина участка шва, $l_{пр}$ – длина промежутка между участками шва. Тогда

$$\alpha = \frac{\pi k}{n(k+1)},$$

а

$$W_{\rho\Sigma} = \frac{\delta d^2 n}{2} \left\{ \frac{2\pi k}{n(k+1)} - \frac{\sin^2\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right]}{\frac{\pi k}{n(k+1)}} \right\}. \quad (9)$$

2. Определение касательных напряжений в круговом прерывистом сварном шве

Зная количество участков прерывистого кругового шва n , длину каждого участка, расстояние между ними, по формуле (9) можно определить полярный момент сопротивления повернутого опасного сечения шва, а по формуле (1) – наибольшие касательные напряжения от крутящего момента T .

Сравним наибольшие касательные напряжения от крутящего момента T в опасном сечении прерывистого и сплошного круговых швов. В работе [8] указывается, что сплошные швы таврового сварного соединения при одинаковой площади разрушения имеют меньшую ресурсоемкость и более

высокую несущую способность по сравнению с цепными прерывистыми швами, однако точные количественные оценки не были получены.

Полярный момент сопротивления сплошного кругового кольца

$$W_{\rho} = \frac{\pi \delta d^2}{2}. \quad (10)$$

Отношение наибольших касательных напряжений в опасном сечении прерывистого шва $\tau_{пр}$ и сплошного шва $\tau_{спл}$ будет равно обратному отношению их полярных моментов сопротивления:

$$\frac{\tau_{пр}}{\tau_{спл}} = \frac{W_{\rho}}{W_{\rho\Sigma}} = \frac{\pi}{n \left\{ \frac{2\pi k}{n(k+1)} - \frac{\sin^2\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right]}{\frac{\pi k}{n(k+1)}} \right\}}. \quad (11)$$

Подставив в формулу (11) величины n и k , можно получить соотношение касательных напряжений для любого случая.

При достаточно большом n второе слагаемое в знаменателе формулы (11) имеет неопределенность $0/0$. Поэтому рассмотрим предел

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin^2\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right]}{\frac{\pi k}{n(k+1)}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \sin\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right] \frac{\sin\left[\frac{\pi k}{n(k+1)}\right]}{\frac{\pi k}{n(k+1)}} \right\} = \frac{\pi k}{n(k+1)}. \quad (12)$$

Тогда

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\tau_{пр}}{\tau_{спл}} = \frac{k+1}{k} = 1 + \frac{1}{k}. \quad (13)$$

Если предположить, что касательные напряжения в пределах каждого участка шва распределяются равномерно, то внешний крутящий момент уравновешивается моментами от сил сопротивления каждого из участков шва, то есть

$$d\delta\alpha\tau_{\text{пр}}^{\perp} \frac{d}{2} n = T, \quad (14)$$

где $\tau_{\text{пр}}^{\perp}$ – касательные напряжения в опасном сечении прерывистого шва.

Из формулы (14) получим

$$\tau_{\text{пр}}^{\perp} = \frac{2T}{\pi d^2 \delta} \frac{k+1}{k}. \quad (15)$$

Касательные напряжения в опасном сечении сплошного шва

$$\tau_{\text{спл}} = \frac{2T}{\pi d^2 \delta}. \quad (16)$$

Тогда отношение наибольших касательных напряжений в опасных сечениях прерывистого шва $\tau_{\text{пр}}^{\perp}$ и сплошного шва $\tau_{\text{спл}}$ будет

$$m = \frac{\tau_{\text{пр}}^{\perp}}{\tau_{\text{спл}}} = \frac{k+1}{k}. \quad (17)$$

В итоге получили результат формулы (13) для предельного случая, когда количество участков шва достаточно велико. То есть формула (17) также является приближением точного решения (11), а наибольшие касательные напряжения от крутящего момента в опасном сечении прерывистого

шва приближенно могут быть определены через аналогичные для сплошного шва:

$$\tau_{\text{пр}} = \tau_{\text{спл}} \frac{k+1}{k} = \tau_{\text{спл}} + \frac{\tau_{\text{спл}}}{k}. \quad (18)$$

Формулу (18) можно использовать для ориентировочной оценки величины максимальных касательных напряжений в прерывистом шве. Зависимости (13) и (17), на основе которых она получена, представлены графически на рис. 2.

Как видно из графика на рис. 2 и формулы (18), при $k = 1$ максимальные касательные напряжения в прерывистом круговом шве в два раза превышают аналогичные в сплошном. При увеличении k соотношение (13) стремится к единице, что вполне естественно, так как прерывистый шов становится сплошным. При уменьшении k соотношение (13) увеличивается, а для малых k – значительно, то есть максимальные касательные напряжения прерывистого шва сильно возрастают. Поэтому следует избегать слишком коротких швов. Их применение может быть оправдано лишь для предварительной ориентации деталей будущего соединения, при его последующей обработке и выполнении основных сварных швов [2; 9; 10].

По условию прочности полученные значения максимальных касательных напряжений не должны превышать допускаемые $[\tau^{\perp}]$, то есть

$$\tau_{\text{пр}} \leq [\tau^{\perp}],$$

где $[\tau^{\perp}]$ – допускаемое касательное напряжение для угловых швов.

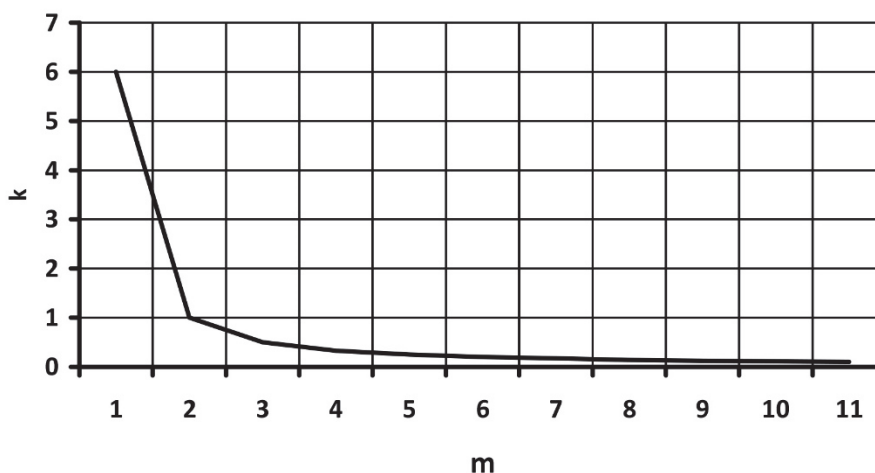


Рис. 2. Зависимость соотношения наибольших касательных напряжений прерывистого и сплошного швов от относительной длины участков прерывистого шва

[Figure 2. Dependence of the ratio of the greatest shear stresses of discontinuous and continuous seams on the relative length of the discontinuous seam sections]

Выводы

Разработана методика расчета полярного момента сопротивления повернутого опасного сечения кругового прерывистого сварного шва, которая учитывает относительную длину участков шва и их количество, а также методика точного и приближенного расчета касательных напряжений в данном сварном шве.

Сравнительный анализ наибольших касательных напряжений от крутящего момента в опасном сечении прерывистого и сплошного швов показал, что их предельное соотношение зависит лишь от относительной длины каждого участка шва по сравнению с длиной промежутка между участками.

При увеличении относительной длины каждого участка шва разница между напряжениями в прерывистом и сплошном швах уменьшается и становится равной нулю при очень большом количестве участков. При уменьшении относительной длины участков шва касательные напряжения в прерывистом шве сильно возрастают. Поэтому следует избегать слишком коротких швов. Они могут использоваться лишь для предварительной ориентации деталей будущего соединения, при его последующей обработке и выполнении основных сварных швов.

Получены расчетная и графическая зависимости для ориентировочной оценки величины максимальных касательных напряжений в круговом прерывистом шве в зависимости от относительной длины участков шва.

Список литературы

1. *Herrera H.H., Eras J.J.C., Morejion M.B., Espinosa R.G.* Stress in butt welded joints of open profiles under torsion // *Ingeniare*. 2015. Vol. 23. No. 4. Pp. 638–646. doi: 10.4067/S0718-33052015000400014

2. *Belousov Y.V., Rekach F.V., Shambina S.L.* Modeling of the Tools' Power Interaction during Mechanical Machining by Cutting // *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2018. Vol. 7. Pp. 132–134.

3. *Vogwell J., Mingués J.M.* Predicting failure in non-continuous welds stamps when used in joints under torsion loading // *Engineering Failure Analysis*. 1997. Vol. 4. No. 4. Pp. 227–236.

4. *Андрюенко Л.А., Байков Б.А., Захаров М.Н. и др.* Детали машин: учебник для вузов / под ред. О.А. Ряховского. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2014. 465 с.

5. *Иванов М.Н., Финогенов В.А.* Детали машин: учебник для машиностроительных спец. вузов. 11-е изд., перераб. М.: Высшая школа. 2007. 408 с.

6. *Белусов Ю.В.* Анализ напряженного состояния кругового прерывистого сварного шва тавровых соединений // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2015. № 3. С. 54–57.

7. *Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б.* Расчет на прочность деталей машин: справочник. 4-е изд., перер. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.

8. *Цумарев Ю.А.* Технико-экономическая эффективность применения прерывистых сварных швов // *Сварочное производство*. 2013. № 2. С. 58–60.

9. *Белусов Ю.В.* Расчет погрешности закрепления при установке заготовок на опоры приспособления // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2018. Т. 19. № 1. С. 38–45.

10. *Shambina S.L., Rekach F.V., Belousov Y.V.* On new modification of some strength criteria for anisotropic materials // *Key Engineering Materials*. 2017. Vol. 724. Pp. 53–57.

Для цитирования

Белусов Ю.В., Клеймук И.А., Страшнов С.В. Разработка методики расчета круговых прерывистых сварных швов на кручение // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 2. С. 134–139. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-134-139>

Development of methodology for calculation of discontinuous circular welds in torsion

Yury V. Belousov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),

5 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

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

Ivan A. Kleymuk

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology),

5 2-ya Baumanskaya St., bldg. 1, Moscow, 105005, Russian Federation

Stanislav V. Strashnov

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

Article history:

Received: March 12, 2019

Revised: May 20, 2019

Accepted: May 28, 2019

Keywords:

welds; the highest shear stresses; polar moment of resistance; turned a dangerous cross-section

The main criterion for the performance of welds is the strength. The least durable are the corner joints used to perform various types of welded joints. In the literature, the methods of calculating the strength of welded joints with solid seams are considered in sufficient detail. Methods of calculation of connection interrupted sutures absent. In this case, the greatest difficulty is the calculation of connections using circular intermittent seams, which are often performed in welded drums and pulleys. They work on torsion. Therefore, the development of methods for calculating circular intermittent seams for torsion is quite important. Shear stresses in welds from torque are determined depending on the value of the polar moment of resistance of its dangerous section. When determining the polar moment of resistance of the dangerous section of a circular discontinuous seam, it was represented by a set of sections in the form of a sector of a circular ring. The method of calculation of the polar moment of resistance of the rotated dangerous section of a circular discontinuous weld, which takes into account the relative length of the weld areas and their number, is proposed, as well as the method of accurate and approximate calculation of shear stresses in the weld.

References

1. Herrera HH, Eras JJC, Morejion MB, Espinosa RG. Stress in butt welded joints of open profiles under torsion. *Ingeniare*. 2015;23(4): 638–646. Available from: doi:10.4067/S0718-33052015000400014

2. Belousov YV, Rekach FV, Shambina SL. Modeling of the Tools' Power Interaction during Mechanical Machining by Cutting. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2018;7: 132–134.

3. Vogwell J, Mingues JM. Predicting Failure in non-continuous welds stamps when used in joints under torsion loading. *Engineering Failure Analysis*. 1997;4(4): 227–236.

4. Andrienko LA, Baykov BA, Zakharov MN, et al. *Detali mashin: uchebnik dlya vuzov [Parts of machines: textbook for universities]*. Moscow: MG TU imeni N.Uh. Bauman Publ.; 2014. (In Russ.)

5. Ivanov MN, Finogenov VA. *Detali mashin: uchebnik dlya mashinostroitel'nyh spec. vuzov. 11-e izd. [Parts of machines: textbook for machine-building special machine parts. 11th ed.]*. Moscow: Vysshaya shkola Publ; 2007. (In Russ.)

6. Belousov YuV. Analiz napryazhennogo sostoyaniya krugovogo preryvistogo svarnogo shva tav-

rovyyh soedinenij [Analysis of the tension state of the circumferential intermittent weld of the t-joining]. *Structural Mechanics of Engineering Construction and Buildings*. 2015;(3): 54–57. (In Russ.)

7. Birger IA, Shorr BF, Iosilevich GB. *Raschet na prochnost' detalej mashin: spravochnik. 4-e izd. [Strength calculation of machine parts: handbook. 4th ed.]*. Moscow: Mashinostroenie Publ; 1993. (In Russ.)

8. Zumarev YA. Tekhniko-ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya preryvistykh svarnykh shvov [Technical and economic effectiveness of intermittent welds]. *Welding production*. 2013;(2): 58–60. (In Russ.)

9. Belousov VV. Raschet pogreshnosti zakrepleniya pri ustanovke zagotovok na opory prispособleniya [Calculation of clamping error when mounting a workpiece on fixture supports]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018;19(1): 38–45. (In Russ.)

10. Shambina SL, Rekach FV, Belousov YV. On new modification of some strength criteria for anisotropic materials. *Key Engineering Materials*. 2016;724: 53–57.

For citation

Belousov YuV, Kleymuk IA, Strashnov SV. Development of methodology for calculation of discontinuous circular welds in torsion. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 134–139. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-134-139>. (In Russ.)

Yury V. Belousov – Associate Professor of Department of Basis of Machine Construction of Bauman MSTU, Associate Professor of Department of Construction of the Academy of Engineering of RUDN University, PhD (Technical Sciences); belou.80@mail.ru

Ivan A. Kleymuk – student of the Mechanical-Technological Department of Bauman MSTU.

Stanislav V. Strashnov – senior lecturer of Department of Construction of the Academy of Engineering of RUDN University, PhD (Technical Sciences).



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146
УДК 621.165.533

Научная статья

Моделирование решетки профилей транспортного газотурбинного двигателя

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

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 11 апреля 2019

Доработана: 16 мая 2019

Принята к публикации: 18 июня 2019

Ключевые слова:

газовая турбина; профиль С8626;

аппроксимация кривыми Безье;

решетка профилей

При разработке газотурбинных двигателей необходимо моделировать проточную часть лопаточных машин (турбины, компрессора). При этом рационально использовать ранее спроектированные профили и решетки профилей. Это связано с тем, что процесс создания профилей сопловых и рабочих решеток требует участия большого коллектива и значительных трудовых и временных затрат. Многие решетки создавались для графоаналитического метода проектирования, что приводит к увеличению сроков разработки, снижению универсальности в плане применения языков программирования и цифровых технологий. В статье представлены расчетная схема решетки сопловых профилей типа С8626, основные фрагменты математической модели решетки, а также результаты проектирования и сравнения геометрических параметров исходного и построенного профилей. Обводы исходного профиля аппроксимированы кривыми Безье 2-го порядка, а входная и выходная кромки – дугами окружностей. Определены координаты точек сопряжения окружностей входной и выходной кромок с выпуклой (спинка) и вогнутой (корытце) поверхностями профиля. После аппроксимации обводов исходного профиля была получена интегральная система уравнений исходного турбинного профиля типа С8626. Предлагаемая математическая модель может рассматриваться как самостоятельная или как подсистема (программный модуль) САПР, представлять страницу электронного атласа профилей и т.д.

Введение

Задача создания высокоэффективной проточной части лопаточных машин, в том числе и турбин, – актуальная, ответственная и очень трудоемкая многопараметрическая задача [1–5]. В практике проектирования профилей турбомашин существует много методов [6; 7]. Один из них – проектирование проточной части с использованием

ранее разработанных профилей (обычно представленных в атласах с известными характеристиками). Для его применения необходимо аналитически описать обводы профиля. Хотя общий алгоритм аналитического описания через аппроксимацию координат можно считать установившимся, возможны и варианты [8; 9].

1. Данные и методы

В настоящей статье применен метод аппроксимации обвода кривыми Безье 2-го порядка [1; 2; 10].

Были исследованы два объекта: первый – математическая модель и алгоритм проектирования, второй – турбинный профиль типа С8626.

На рис. 1 представлена расчетная схема решетки профилей С8626.

Мамаев Владимир Константинович – старший преподаватель департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии.

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

Ощепков Петр Платонович – доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, кандидат технических наук; oshchepkov-pp@rudn.ru

© Мамаев В.К., Виноградов Л.В., Ощепков П.П., 2019

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



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

Объектом исследования и проектирования был профиль С8626 и решетка из этих профилей с атласными параметрами: хорда профиля $b = 52$ мм, радиусы входной и выходной кромок $R = 0,5$ мм, угол установки профиля в решетке $\gamma = 47^\circ$, относительный шаг $t = 0,66$. В табл. 1 приведена матрица координат обвода исходного профиля, где первая строка – абсциссы, вторая – ординаты спинки, третья – ординаты корытца.

Для контроля корректности исходных данных строим точечный график профиля в исходной системе координат (рис. 2).

Из графика видно, что «выпадающих» точек нет.

Для аппроксимации области входной кромки со стороны спинки было записано уравнения окружности радиусом $r_1 = 0,5$ мм (в статье и на графиках все линейные размеры указаны в миллиметрах).

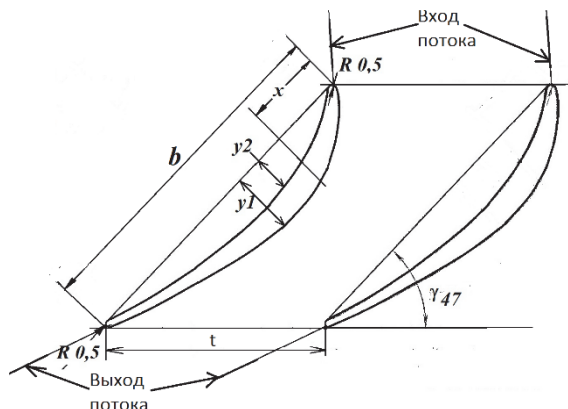


Рис. 1. Расчетная схема решетки профилей С8626: b – хорда профиля; R – радиусы входной и выходной кромок профиля; x – абсцисса исходной системы координат; y_1, y_2 – ординаты спинки и корытца профиля соответственно; γ – угол установки профиля в решетке; t – шаг профиля в решетке
[Figure 1. Design scheme for lattice profiles with C8626: b – profile chord; R – leading and trailing edge radius; x – abscissa of original coordinate system; y_1, y_2 – profile suction and pressure side ordinates; γ – angle of installation of a profile in a lattice; t – profile step in a lattice]

Таблица 1

Матрица координат компрессорного профиля С8626
[Table 1. Matrix of coordinates of compressor profile with C8626]

x	0,5	1	1,5	2	3	4	6	8	10	12	–	–
y_1	1,9	2,49	3,02	3,54	4,52	5,37	6,82	7,94	8,91	9,43	–	–
y_2	0	0,12	0,45	0,76	1,38	1,96	3,0	3,87	4,55	5,13	–	–
x	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	–	–
y_1	9,81	10,02	10,08	10,01	9,82	9,53	9,17	8,75	8,3	7,81	–	–
y_2	5,58	5,89	6,08	6,12	6,14	6,07	5,92	5,71	5,43	5,06	–	–
x	34	36	38	40	42	44	46	48	50	51	51,5	52
y_1	7,3	6,73	6,12	5,46	4,76	4,03	3,29	2,53	1,75	1,34	1,03	0,5
y_2	4,64	4,17	3,7	3,15	2,59	2,01	1,42	0,8	0,21	0,12	0	0,5

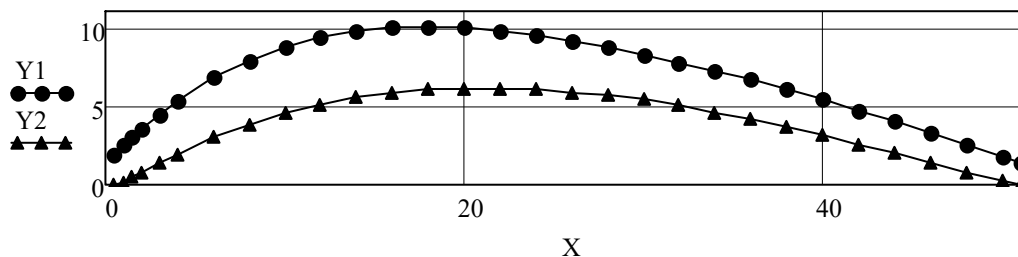


Рис. 2. Точечный график исходного профиля С8626:
 ● – точки обвода спинки профиля; ▲ – обвод корытца
[Figure 2. A scatter plot of the nominal profile C8626:
 ● – suction side contour points; ▲ – pressure side contour]

2. Результаты вычислений

Анализ области входной кромки со стороны спинки профиля с учетом угла установки профиля в решетке $\gamma = 47^\circ$ и угла натекания потока

$\beta_1 = 860$ показал, что координаты аппроксимационной кривой Безье могут быть приняты равными $x_A = 0, y_A = r_1 = 0,5$. Правая опорная точка (точка C характеристического треугольника кри-

вой Безье) первого участка аппроксимации была найдена итерационным методом, ее координаты $x_C = 1, y_C = 2,49$. Средняя опорная точка B определялась на пересечении касательной из точки C с осью ординат Y .

В результате было получено уравнение аппроксимационной кривой Безье 2-го порядка для первого участка с учетом особенности ее положения в декартовых координатах в виде

$$y_{app}(x) = 0,207114 \cdot x + 1,782886 \cdot \sqrt{x} + 0,5.$$

Второй участок аппроксимации сопрягается по 1-му классу гладкости [4], то есть до первой производной, когда начало последующего участка совпадает с концом предыдущего участка. Как

указывалось ранее, координаты конца участка находятся итерационным вариантом. Для второго участка правая граница аппроксимации имеет координаты $x_{2C} = 20, y_{2C} = 10,01$.

Уравнение кривой Безье второго участка имеет вид

$$y_{2app}^2(x) := 16,551078 \cdot y_{2A} \cdot t_2(x) - 9,031078 \cdot t_2(x)^2 + 2,49,$$

где

$$t_2(x) := 0,254207 \sqrt{3,933806 \cdot x + 52,813744} - 1,914964.$$

Важным показателем результата аппроксимации является индекс корреляции. В настоящей работе в качестве примера был исследован ряд вариантов ширины второго участка аппроксимации, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Индекс корреляции второго участка в зависимости от правой границы участка
[Table 2. Correlation index of the second plot depending on the right border of the plot]

Абсцисса [Abscissa]	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Индекс корреляции [Correlation index]	0,99998	0,99997	0,99995	0,99992	0,99989	0,99981	0,99967	0,999386	0,99893

Из таблицы видно, что до точки $x = 30$ индекс корреляции достаточно высокий, практически не ниже 0,999. Однако для последующих построений конечной точкой второго участка и начальной точкой третьего участка была принята точка 14 с индексом корреляции 0,99989. Естественно, можно сделать вывод о том, что для повышения индекса корреляции следует уменьшать ширину аппроксимируемого участка, однако тогда на обводе кривой будет больше теоретических участков с разрывом кривизны (места сопряжения).

Следует отметить, что суммарный индекс корреляции аппроксимации первого и второго участков составил 0,99992.

Следующий участок – третий – с абсциссой правой границы $x = 46$. В результате итерационных расчетов было получено следующее аппроксимационное уравнение:

$$y_{3bz}(x) := 10,01 - 1,275468 \cdot t_3(x) - 5,444532 \cdot t_3(x)^2,$$

где

$$t_3(x) := 0,150555 \cdot \sqrt{6,642074 \cdot x - 39,159155} - 1,45722.$$

Четвертый участок аппроксимации спинки сопрягается с дугой окружности выходной кромки. Итерационным способом были определены координаты точки сопряжения: $x_{4C} = 51,75, y_{4C} = 0,933013$. После этого было записано уравнение кривой

Безье 2-го порядка для четвертого участка спинки в виде

$$y_{4bz}(x) = 1,148795 \cdot t_4(x)^2 - 3,505782 \cdot t_4(x) + 3,29,$$

где

$$t_4(x) = -0,273422 \cdot \sqrt{-3,657348 \cdot x + 190,362557} + 1,286089.$$

Дуга окружности выходной кромки спинки строится в интервале $51,75 \leq x \leq 52$.

На рис. 3 показана спинка профиля, построенного по четырем уравнениям кривых Безье 2-го порядка и уравнению верхней полуокружности выходной кромки.

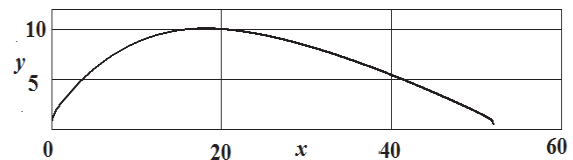


Рис. 3. Спинка профиля S8626, построенная по аппроксимационным уравнениям кривых Безье 2-го порядка и уравнению верхней полуокружности выходной кромки
[Figure 3. Profile 8626 suction side, constructed by approximation equations of Bezier curves of the 2nd order and the equation of the upper semicircle of the output edge]

Заключительным шагом этапа аппроксимации спинки профиля был расчет индекса корреляции

обвода спинки в целом. Расчет показал, что этот индекс равен 0,999896. Таким образом, можно утверждать, что аппроксимация по предлагаемой математической модели удовлетворительная. Как отмечалось ранее, можно несколько повысить индекс корреляции, но для этого следует увеличить число сопрягаемых участков, имеющих 1-й уровень гладкости [4].

Аппроксимация корытца профиля осуществлялась по алгоритму, аналогичному реализованному для спинки профиля. В результате корытце профиля С8626 было аппроксимировано дугой нижней полуокружности входной кромки, четырьмя кривыми Безье 2-го порядка и дугой нижней полуокружности выходной кромки. В порядке проведения аппроксимации корытца далее приведены уравнения аппроксимации с интервалами их применения.

Дуга нижней полуокружности входной кромки

$$C2(x) = -\sqrt{0,25 - (x - 51,5)^2} - 0,5 \quad \text{при } 0 \leq x \leq 0,5;$$

первая кривая Безье 2-го порядка

$$y1w_{app}(x) := 0,45 \cdot t1w(x)^2,$$

где

$$t1w(x) = 2,934238 \cdot \sqrt{0,340804 \cdot x - 0,061767} - 0,967119$$

при $0,5 \leq x \leq 1,5$;

вторая кривая Безье 2-го порядка

$$y2w_{app}(x) := 11,381624 \cdot t2w(x) - 5,690816 \cdot t2w(x)^2 + 0,45,$$

где

$$t2w(x) = 0,302297 \cdot \sqrt{3,308002 \cdot x + 66,915481} - 2,562894$$

при $1,5 \leq x \leq 21,76412$;

третья кривая Безье 2-го порядка

$$y3w_{app}(x) = 6,140808 - 4,130808 \cdot t3w(x)^2,$$

где

$$t3w(x) = 0,175341 \cdot \sqrt{5,703184 \cdot x - 55,792272} - 1,449427$$

при $21,76412 \leq x \leq 44$;

четвертая кривая Безье 2-го порядка

$$y4w_{app}(x) = 2,01 \cdot (1 - t4w(x))^2,$$

где

$$t4w(x) = -0,164074 \cdot \sqrt{-6,094802 \cdot x + 314,375948} + 1,115278$$

при $44 \leq x \leq 51,5$;

уравнение нижней полуокружности выходной кромки

$$C2(x) = -\sqrt{r_2^2 - (x - b + r_2)^2} + r_2 \quad \text{при } 51,5 \leq 52.$$

В процессе проведения аппроксимации корытца на каждом этапе контролировался индекс корреляции. В результате индекс корреляции аппроксимации корытца профиля дугами нижних полуокружностей входной и выходной кромок и четырьмя кривыми Безье 2-го порядка составил 0,999851. С учетом того, что координаты обводов профиля изначально заданы в матрице с округлением, результат реализации предлагаемой математической модели профиля типа С8626 можно считать удовлетворительным.

На рис. 4 представлен профиль С8626 с центром тяжести, построенный по аппроксимационным аналитическим уравнениям для спинки и корытца.

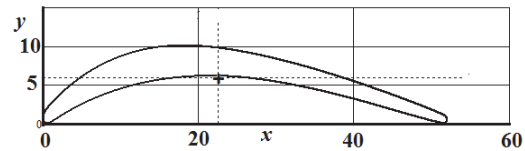


Рис. 4. Профиль С8626, построенный по аппроксимационным уравнениям: — обводы профиля; + центр тяжести профиля
[Figure 4. С8626 profile, built on approximating equations: — profile contour; + the center of gravity of the profile]

На рис. 5 показана развертка сопловой решетки с номинальным относительным шагом 0,66.

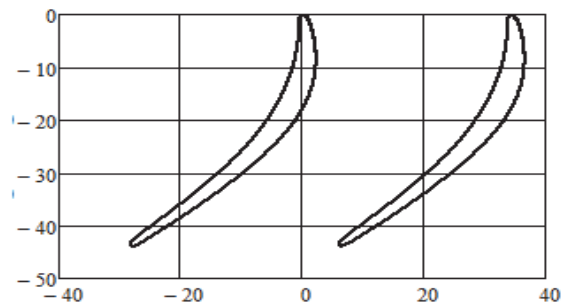


Рис. 5. Развертка сопловой решетки
[Figure 5. Development of a nozzle lattice]

Аналитический формат обводов профиля позволил рассчитать некоторые геометрические ха-

рактеристики профиля в исходной системе координат, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Геометрические характеристики профиля C8626
[Table 3. Profile geometry with C8626]

№ п/п	Наименование параметра [Name of parameter]	Обозначение [Designation]	Величина [Value]
1	Площадь профиля, мм ² [The area of profile, mm ²]	F	157,316
2	Статический момент инерции относительно оси X, мм ³ [Static moment of inertia with respect to the X-axis, mm ³]	S_x	923,314
3	Статический момент инерции относительно оси Y, мм ³ [The static moment of inertia about the Y-axis, mm ³]	S_y	3,544114×10 ³
4	Момент инерции относительно оси Y, мм ⁴ [Moment of inertia about Y-axis, mm ⁴]	I_y	1,084702×10 ⁵
5	Момент инерции относительно оси X, мм ⁴ [Moment of inertia about X-axis, mm ⁴]	I_x	6,359121×10 ³
6	Центробежный момент инерции относительно осей X, Y, мм ⁴ [The product of inertia with respect to axes X, Y, mm ⁴]	I_{xy}	1,97848×10 ⁴
7	Абсцисса центра тяжести, мм [The abscissa of the centre of gravity, mm]	X_c	22,528685
8	Ордината центра тяжести, мм [The ordinate of the centre of gravity, mm]	Y_c	5,926392
9	Максимальный момент инерции относительно главной центральной оси V, мм ⁴ [Maximum moment of inertia relative to the main central axis V, mm ⁴]	J_{max}	2,867936×10 ⁴
10	Минимальный момент инерции относительно главной центральной оси U, мм ⁴ [Minimum moment of inertia relative to the main central axis U, mm ⁴]	J_{min}	780,496335
11	Угол наклона главных центральных осей к исходным координатным осям, град. [The angle of inclination of the main central axes to the initial coordinate axes, deg.]	δ	-2,51
12	Максимальная толщина профиля (абсолютное значение) [Maximum profile thickness (absolute value)]	D_{max}	4,080
13	Относительная максимальная толщина профиля (относительно хорды) [Relative maximum profile thickness (relative to the chord)]	$D_{отн}$	0,078
14	Относительная абсцисса центра окружности максимальной толщины [Relative abscissa of the center of the circle of maximum thickness]	$x_{Дотн}$	0,275
15	Относительная абсцисса места максимальной вогнутости [Relative abscissa of the place of maximum concavity]	b_f	0,365

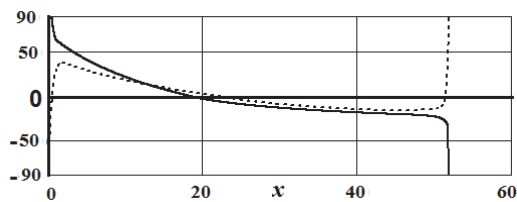


Рис. 6. Изменение угла наклона касательной к обводу профиля:
 — — спинка; - - - корытце
[Figure 6. Change of a tilt angle of a tangent to profile contour:
 — — suction side of the airfoil; - - - pressure side of the airfoil]

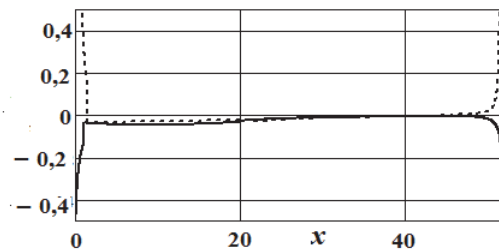


Рис. 7. Изменение кривизны по обводу профиля:
 — — спинка профиля; - - - корытце профиля
[Figure 7. Change of curvature on profile length:
 — — suction side of the airfoil; - - - pressure side of the airfoil]

На рис. 6 и 7 показаны важные геометрические характеристики для решетки профилей: изменение угла наклона касательных к обводу профиля и распределение кривизны профиля.

Из графиков на рис. 6 и 7 видно, что при аппроксимации обводов семейством аналитических функций имеет место автоматический сглаживающий эффект. Это позволяет более корректно при

необходимости рассчитывать параметры течения в решетке при учете их градиента поперек потока. (Теоретически имеющиеся разрывы кривизны обвода спинки в месте сопряжения аналитических кривых на графике не видны в силу их малости.)

Естественно, что наибольшее изменение параметров (углов и кривизны) наблюдается в области входной и выходной кромок. На большей части профиля геометрические характеристики плавно изменяются.

Выводы

В результате проведенного исследования разработана математическая модель аппроксимации обводов соплового профиля типа С8626 серией аналитических кривых: дуг окружностей и кривых Безье 2-го порядка. Спинка профиля (выпуклая часть) аппроксимирована четырьмя кривыми Безье 2-го порядка и дугой окружности верхней полуокружности радиусом выходной кромки. Корытце профиля (вогнутая часть) аппроксимировано дугой нижней полуокружности радиуса входной кромки, четырьмя кривыми Безье 2-го порядка и дугой нижней полуокружности радиусом выходной кромки.

Аналитическая форма описания обводов профиля позволяет вести проектирование профилей и решеток на их базе практически на любых языках. То есть разработанная математическая модель не «привязана» к определенному языку или пакету программирования типа Mathcad, Excel и т.д.

Аналитическая форма описания профиля позволяет применять нелинейные преобразования при малых изменениях угла поворота потока в решетке профилей.

Статистическая оценка результатов аппроксимации матрицы координат обводов спинки и корытца профиля показала, что спинка аппроксимирована с индексом корреляции 0,999896, а корытце – с индексом корреляции 0,999851. С учетом того, что значения исходных координат заданы с округлением до второго знака после запятой, результат можно признать удовлетворительным. Для повышения индекса корреляции следует увеличить число участков аппроксимации.

Список литературы

1. Батулин О.В. Профилирование рабочих колес радиально-осевых турбин с помощью кривых Безье // Вестник СГАУ. Авиационная и ракетно-космическая техника. 2011. № 3 (27). С. 125–130.
2. Виноградов Л.В., Алексеев А.П., Костюков А.В. Профиль лопатки турбины из кривых Безье. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2013. № 3. С. 10–14.
3. Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ощепков П.П. Турбинный профиль АЗК7 – НАСА: автоматизация проектирования. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. № 3. С. 299–307.
4. Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ощепков П.П. Компрессорный профиль С4: автоматизация проектирования. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. № 2. С. 155–164.
5. Виноградов Л.В. Профилирование лопаток турбин кривыми Безье // Инженерные системы – 2015: труды VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 20–22 апреля 2015 / под общ. ред. Н.К. Пономарева. 2015. С. 564–571.
6. Виноградов Л.В. Повышение эффективности работы дизелей в условиях высокогорья и жаркого климата: учеб. пособие. М.: РУДН, 2008. 187с.
7. Иванов Г.С. Конструирование технических поверхностей (математическое моделирование на основе нелинейных преобразований). М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
8. Макаров Е. Инженерные расчеты в Mathcad: учебный курс. СПб.: Питер, 2003. 448 с.
9. Concepts NREC. URL: <http://www.rescent.ru/software/axcent>
10. Грушин М.А. Аппроксимация профилей лопаток компрессора с помощью кривых Безье // Наука и образование. 2010. № 7. URL: <https://docplayer.ru/67835226-Approksimaciya-profiley-lopatok-kompressora-s-pomoshchyu-krivyh-beze.html>

Для цитирования

Мамаев В.К., Виноградов Л.В., Ощепков П.П. Моделирование решетки профилей транспортного газотурбинного двигателя // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 140–146. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146>

Modeling the set of blade profiles of a gas turbine engine

Vladimir K. Mamaev, Leonid V. Vinogradov, Petr P. Oschepkov

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

Article history:

Received: April 11, 2019

Revised: May 16, 2019

Accepted: June 18, 2019

Keywords:

gas turbine; profile C8626; approximation by Bezier curves; profile grid

In the development of gas turbine engines (GTE) it is necessary to simulate the flow section of blade machines (turbines, compressors). At the same time, it is rational to use previously designed profiles and set of profiles with high aerodynamic and efficient performance. This is due to the fact that the process of creating profiles of a nozzle and moving blades set requires the participation of a large team and considerable labor and time costs. Many sets were created for the graphic-analytical design method, which leads to an increase in the development time and a decrease in the universality in terms of the use of programming languages and digital technologies. The article presents the design scheme of the nozzle profile sets of type C8626, the main fragments of the mathematical model of the sets, the results of the design of the original profile C8626 and the sets, comparison of the geometric parameters of the source and built profiles. The contours of the initial profile are approximated by second-order Bezier curves, and the leading and trailing edges are circular arcs. The coordinates of the points of conjugation of the circles of the leading and trailing edges with convex (suction side) and concave (pressure side) profile surfaces are determined. After approximation of the contours of the initial profile, an integral system of equations of the original C8626 turbine profile was obtained. The proposed mathematical model can be considered as independent, it can be a subsystem (software module) of CAD, to represent the shearer of the electronic atlas of profiles and etc.

References

1. Baturin OV. Profiling of impellers of radial-axial turbines using Bezier curves. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2011;3(27): 125–130. (In Russ.)
2. Vinogradov LV, Alekseev AP, Kostyukov AV. Profile of the turbine blade of Bezier curves. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering researches*. 2013;(3): 10–14. (In Russ.)
3. Vinogradov LV, Mamaev VK, Oschepkov PP. CAD of turbine profile type A3K7 NACA by the method of nonlinear transformation. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;18(3): 299–307. (In Russ.)
4. Vinogradov LV, Mamaev VK, Oschepkov PP. Computer-aided design of type C4: compressor blade profile. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018;19(2): 155–164. (In Russ.)
5. Vinogradov LV. Profilirovaniye lopatok turbin krivymi Bez'ye [Profiling of turbine blades by Bezier curves]. In: Ponomarev NK. (ed.) *Engineering systems – 2015: Proceedings of VIII International Scientific-Practical Conference*. 2015; 564–571. (In Russ.)
6. Vinogradov LV. Povysheniye effektivnosti raboty dizeley v usloviyakh vysokogor'ya i zharkogo klimata: uchebnoe posobie [*Improving the efficiency of diesel engines in the highlands and hot climate: textbook*]. Moscow: RUDN University Publ.; 2008. (In Russ.)
7. Ivanov GS. Konstruirovaniye tekhnicheskikh po-verkhnostey (matematicheskoye modelirovaniye na osnove nelineynykh preobrazovaniy) [*Designing of technical surfaces (mathematical modelling based on nonlinear transformations)*]. Moscow: Mashinostroenie Publ; 1987. (In Russ.)
8. Makarov E. Inzhenernyye raschety v Mathcad: uchebnyy kurs [*Engineering calculations in Mathcad: textbook*]. Saint Petersburg: Piter Publ.; 2003. (In Russ.)
9. Concepts NREC. Available from: <http://www.rescent.ru/software/axcent>
10. Grushin MA. Approksimatsiya profilei lopatok kompressora s pomoshch'yu krivyykh Bez'e [Approximation of compressor blade profiles using Bezier curves]. *Nauka i obrazovanie [Science and Education]*. 2010;(7). Available from: <https://docplayer.ru/67835226-Approksimatsiya-profiley-lopatok-kompressora-s-pomoshchyu-krivyyh-beze.html> (In Russ.)

For citation

Mamaev VK, Vinogradov LV, Oschepkov PP. Modeling the set of blade profiles of a gas turbine engine. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 140–146. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146>. (In Russ.)

Vladimir K. Mamaev, senior lecturer at the Department of Mechanical and Instrument Engineering of Academy of Engineering.

Leonid V. Vinogradov, educational master at the Department of Mechanical and Instrument Engineering of Academy of Engineering, PhD in Technical Sciences, Associate Professor.

Petr P. Oschepkov, Associate Professor at the Department of Mechanical and Instrument Engineering of Academy of Engineering, PhD in Technical Sciences; oschepkov-pp@rudn.ru



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-147-154
УДК 62-932.2

Научная статья

Обеспечение работоспособности акустических расходомеров вне пределов оптимальных значений расхода жидкости

М.В. Лапин, А.О. Гринин, К.В. Шкарин, К. Сури

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 19 апреля 2019

Доработана: 20 июня 2019

Принята к публикации: 28 июня 2019

Ключевые слова:

акустический расходомер; погрешность прибора; нерасчетный режим; расширение диапазона измерений

Статья посвящена проблеме измерения расхода жидкости с помощью акустических приборов. Производители расходомеров устанавливают допустимый диапазон измерений (номинальный), в пределах которого погрешность измерения является минимальной, поэтому для подобных устройств диапазон измерений ограничен, а погрешность измерений при работе на нерасчетных режимах является неприемлемой. Основной задачей исследования является расширение диапазона измерения расхода акустических счетчиков жидкости, а также повышение точности измерения. В.А. Фафурин и М.К. Галеев в своей работе «Расчет корректирующего коэффициента ультразвукового расходомера» уже рассматривали проблему измерения расхода акустических приборов. В их исследовании был представлен метод расчета корректирующего коэффициента, который зависел от режима потока в трубе. Однако данная технология применима для труб, в которых не происходит изменение режима потока. В данной же статье авторы предлагают использовать коэффициент, имеющий функциональную зависимость от величины расхода, полученную эмпирическим путем. В статье описаны этапы проведения исследования: методика поверки прибора, способы анализа и обработки данных поверки при помощи ЭВМ, алгоритм внедрения системы измерения в энергоустановки, проверка работоспособности системы. Представленная в статье система позволяет расширить диапазон измерения акустических расходомеров и повысить точность измерения. Предложенная модель будет полезна для предприятий.

Введение

Почти все применяемые на практике акустические расходомеры работают в ультразвуковом диапазоне частот и поэтому называются ультразвуковыми.

Лапин Михаил Владимирович – студент 2 курса магистратуры, направление «Энергетическое машиностроение», Инженерная академия; alo14@yandex.ru
Гринин Андрей Олегович – студент 2 курса магистратуры, направление «Энергетическое машиностроение», Инженерная академия.

Шкарин Кирилл Владимирович – ассистент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии.

Сури Камбиз – ассистент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии.

© Лапин М.В., Гринин А.О., Шкарин К.В., Сури К., 2019

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



Ультразвуковой расходомер – это устройство, прямым назначением которого является измерение акустических эффектов, возникающих при движении вещества, расход которого необходимо измерить [1].

После сборки счетчика-расходомера производитель проводит ряд стендовых испытаний при различных расходах и давлении рабочего тела в магистрале. Результаты стендовых испытаний заносят в технический паспорт датчика. После этого его можно использовать как в промышленной отрасли и частном секторе, так и в научной области. Однако даже если калибровка расходомера проводилась изготовителем, то с целью по-

вышения точности и достоверности результатов измерения следует дополнительно проводить калибровку счетчика-расходомера непосредственно после окончательного его монтажа в магистрали установки [2]. Некоторые счетчики-расходомеры способны оптимально работать при определенных расчетных режимах расхода рабочего тела, установленных производителем. Поэтому при очень малых или при очень больших расходах присутствует большая погрешность измерений [3; 4].

Значение ЭВМ весьма существенно не только для повышения точности измерения расхода, но и для облегчения эксплуатации приборов и сокращения обслуживающего ее персонала [5].

Целью данного исследования является разработка системы, позволяющей повысить точность измерения и расширить границы оптимальной работы счетчика-расходомера. В статье рассмотрен метод поверки акустического счетчика-расходомера АС-001-15 производства ОАО «Завод «Старорусприбор»».

1. Схема и принцип действия расходомера

Счетчик содержит проточную часть (1) и электронный блок (2) (рис. 1). Проточная часть выполнена в виде полого цилиндра особой конструкции, внутри которого установлены пьезодатчики (4), одновременно выполняющие роль излучателей и приемников ультразвуковых волн и системы зеркал (5), направляющих ультразвуковую волну под определенным углом к направлению движения среды. Электронный блок (2) соединен при помощи стоек (3) с проточной частью (1).

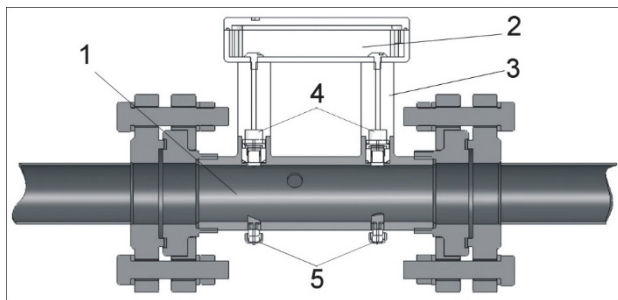


Рис. 1. Принципиальная схема счетчика-расходомера ФС-0012-15

[Figure 1. Layout diagram of acoustic flow meter FS-0012-15]

Работа счетчика основана на измерении разности времени прохождения импульсов ультразвукового сигнала по направлению движения потока рабочего тела и против его потока в трубопрово-

де [6]. Сигналы от пьезодатчиков поступают в вычислитель счетчика, который пересчитывает эти сигналы в объемный расход. При определении расхода учитывают количество импульсов, поступающих от пьезодатчиков, и их вес (цену).

Идея системы исходит из время-импульсного принципа действия акустического счетчика-расходомера. В вычислителе счетчика производится расчет мгновенного объемного расхода по формуле

$$Q = n \cdot K, \quad (1)$$

где Q – расход жидкости; n – количество импульсов, поданных преобразователем в секунду; K – цена (вес) импульса.

2. Постановка проблемы

При проведении эксперимента было установлено, что в зависимости от режима движения потока в трубопроводе меняется как количество импульсов, так и цена одного импульса [7]. Количество импульсов в секунду изменяется прямо пропорционально расходу жидкости. Очевидно, что погрешность расчета расхода пропорциональна не точности определения корректирующего коэффициента [8]. Отсюда можно предположить, что возникновение погрешностей при работе на нерасчетных режимах является следствием того, что расходомер запрограммирован на расчет расхода, учитывающий только одно определенное значение цены импульса K . Это объясняется тем, что в вычислителе отсутствуют устройства для сравнения количества импульсов, поданных преобразователем, а также не установлены диапазоны цены импульса, зависящие от режима потока жидкости. Устранить данный недостаток позволяет специальное ПО на базе программы SCADA-ZetView.

Для работы системы счетчик должен иметь выход на компьютер. В данном случае расходомер имеет выход на компьютер через встроенный интерфейс RS-485. Во время работы пьезодатчики счетчика-расходомера подают сигналы на АЦП-модуль, которые регистрируются на компьютере. Полученное компьютером значение является текущим количеством импульсов n , подаваемых счетчиком за единицу времени. Для правильной работы счетчика необходимо также знать значение цены импульса K , зависящей от режима потока жидкости. Данные значения могут быть получены только по результатам проведения поверки.

3. Методика поверки

Для проверки данного предположения был выбран метод поверки с помощью массового расхода [9]. С целью минимизации погрешностей при измерении массы и времени были приняты минимальная масса жидкости, равная 4 кг, и интервал времени поверки – 3 минуты, а также усредненные значения количества импульсов n , подаваемых счетчиком за единицу времени. Для определения цены импульса была использована программа, состоящая из следующих компонентов:

- счетчика количества импульсов за определенный промежуток времени;
- счетчика текущего количества импульсов, подаваемых счетчиком за секунду;
- счетчика среднего значения количества импульсов, подаваемых счетчиком за секунду;
- секундомера с погрешностью $\pm 0,05$ с.

Для повышения точности измерения и высокой стабильности в счетчиках малых диаметров – Ду 15, 25, 32, 40 используется так называемое осевое зондирование с практически полным «озвучиванием» всего сечения потока (достигается использованием акустического луча диаметром близким к диаметру измерительного участка счетчика), что позволяет осуществить полное усреднение эпюры скоростей потока воды, и, как следствие, для этих счетчиков предъявляются менее жесткие требования к прямым участкам трубопроводов [6]. Поэтому при проведении эксперимента эпюра распределения скоростей в трубопроводе не учитывается в связи с малым диаметром трубопровода (15 мм).

1. Средства поверки:

- персональная ЭВМ, соответствующая минимальным системным требованиям, с собранной схемой на базе программы ZetView [10];
- АЦП модуль;
- поверочная емкость объемом до 5 л;
- электронные весы с погрешностью $\pm 0,001$ кг.

2. Условия поверки:

- установившийся режим движения потока в трубопроводе [11; 12];
- изменения расхода в процессе поверки не должно превышать ± 5 % от установившегося значения;
- отсутствие внешних электрических и магнитных полей, влияющих на работу счетчика.

3. Подготовка к поверке:

- подготовка к работе проверяемых счетчиков и измерительного оборудования;
- проверка правильности собранной схемы поверки счетчика;

- проверка герметичности установки;
- после установки и подачи давления счетчик перед поверкой следует выдержать в течении 5 минут [6].

За эталонное значение принят расход, рассчитанный при помощи поверки.

4. Обработка и анализ данных поверки

Во время проведения поверки одновременно с наполнением поверочной емкости начинают работу счетчик суммы импульсов и счетчик среднего значения количества импульсов, подаваемых счетчиком за 1 секунду. С помощью секундомера отсчитывается время проведения поверки. По истечении времени подача жидкости в емкость поверки прекращается, вместе с этим одновременно счетчик количества импульсов и счетчик среднего значения количества импульсов, подаваемых счетчиком за 1 секунду, останавливаются. Результаты заносятся в протокол измерений и обрабатываются (таблица). После этого строятся графики зависимости цены импульса от расхода измеряемой жидкости (рис. 2) и зависимости погрешностей измерений счетчика и измерений, сделанных расчетным методом относительно эталонного расхода (рис. 3).

Из результатов эксперимента следует подтверждение предположения о зависимости цены импульса от расхода измеряемой жидкости. Результаты эксперимента принято считать удовлетворительными при погрешности ± 2 %. В ходе проведения эксперимента максимальное отклонение расчетного расхода от экспериментального не превысило 1 %. Появление двусторонних случайных погрешностей часто связывают с воздействием большого числа факторов на процесс измерений, влияние каждого из которых не является существенным по сравнению с остальными факторами [13].

После того, как зависимость цены импульса от величины расхода была доказана, необходимо было создать метод расчета расхода, опираясь на результаты поверки. Используя полученную зависимость, возможно минимизировать погрешности расхода жидкости. Из графика (рис. 2.) видно, что значение цены импульса зависит от значения расхода, а следовательно, и от количества импульсов в секунду, согласно (1). Также из графика на рис. 2. видно, что при расходе от 134 л/ч и выше значения находятся в пределах требуемой точности измерения (1 %), поэтому было принято упрощение, что на этом участке изменение цены импульса не происходит.

Протокол измерений
[Table. Test log]

№ [No.]	$m_{\text{экс}} \text{ г}$ [$m_{\text{exgr}} \text{ gr}$]	$T, \text{ с}$ [$T, \text{ s}$]	$N_{\text{имп}}$ [N_{imp}]	$n_{\text{экс, имп/с}}$ [$n_{\text{exgr, imp/s}}$]	$K, \text{ мл/имп}$ [$K, \text{ ml/imp}$]	$Q_{\text{экс}} \text{ л/ч}$ [$Q_{\text{exgr}} \text{ L/h}$]	$Q_{\text{рас}} \text{ л/ч}$ [$Q_{\text{calc}} \text{ L/h}$]	$Q_{\text{пок.сч}} \text{ л/ч}$ [$Q_{\text{fmet}} \text{ L/h}$]	$\Delta p, \%$ [$\Delta \text{calc}, \%$]	$\Delta c, \%$ [$\Delta \text{fmet}, \%$]
1	4016	240	903	3,8	4,447	60,2	60,8	53,0	1,00	12,02
2	5403	180	1302	7,2	4,150	108,1	107,6	99,5	0,46	7,92
3	7978	180	2013	11,1	3,963	159,6	158,4	151,5	0,75	5,05
4	10539	180	2655	14,7	3,969	210,8	210,1	203,0	0,34	3,69
5	13117	180	3277	18,2	4,003	262,3	262,3	253,0	0,03	3,56
6	15511	180	3887	21,7	3,990	310,2	311,7	300,5	0,49	3,13
7	17950	180	4574	25,4	3,924	359,0	358,8	348,5	0,04	2,92
8	20797	180	5271	29,3	3,946	415,9	416,2	403,0	0,06	3,11
9	23207	180	5900	32,8	3,933	464,1	464,5	450,0	0,07	3,05

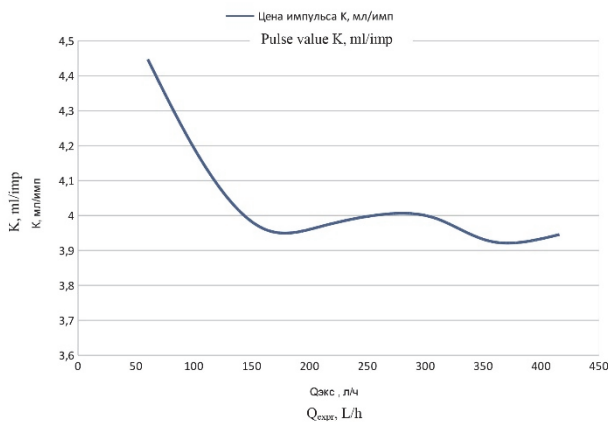


Рис. 2. Зависимость цены импульса K от расхода измеряемой жидкости $Q_{\text{экс}}$
[Figure 2. Dependence of the pulse value K on the liquid flow Q_{exgr}]

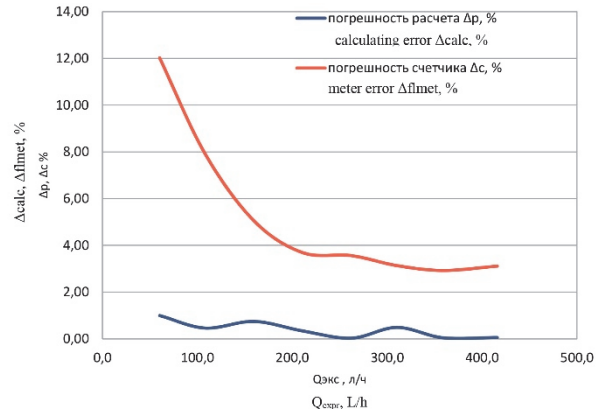


Рис. 3. Зависимость погрешностей измерений от расхода жидкости
[Figure 3. Dependence of the measuring accuracy on the liquid flow]

5. Определение функциональной зависимости

Для создания рабочей программы в конструкторском приложении ZetView необходимо представить график в виде математической зависимости. Поэтому были рассмотрены три варианта описания графика функции:

- множество линейных функций;
- полиномиальная функция 6-го порядка;
- комбинация линейной и квадратичной функций.

Исходя из анализа описанных выше вариантов, наиболее оптимальной была выбрана комбинация линейной и квадратичной функций, так как при одинаковой погрешности всех трех функций данный метод имел наименьшее количество гра-

ничных условий, что максимально упрощало расчет в пределах допустимой погрешности.

Для нахождения переменных, входящих в функцию, был применен метод решения систем уравнений при помощи обратной матрицы. Для этого, основываясь на данных из таблицы результатов поверки, были составлены матрицы уравнений A , матрицы свободных членов B и матрицы неизвестных членов X . Перемножая обратную матрицу A на матрицу B , была получена матрица значений, которые подставляются в формулу расчета расхода.

В ходе вычислений были получены следующие зависимости:

- для изменения цены импульса в диапазоне от 7,2 до 9,4 имп/с:

$$K = 0,0066 \cdot n_{\text{ЭКС}}^2 - 0,1688 \cdot n_{\text{ЭКС}} + 5,0223; \quad (2)$$

– для изменения цены импульса в диапазоне от 0 до 7,2 имп/с:

$$K = -0,0875 \cdot n_{\text{ЭКС}} + 4,78; \quad (3)$$

– для изменения цены импульса в диапазоне свыше 9,4 имп/с:

$$K = 3,961 \text{ мл/имп.}$$

Таким образом, каждому участку графика соответствует своя зависимость. Результат моделирования представлен на рис. 5.

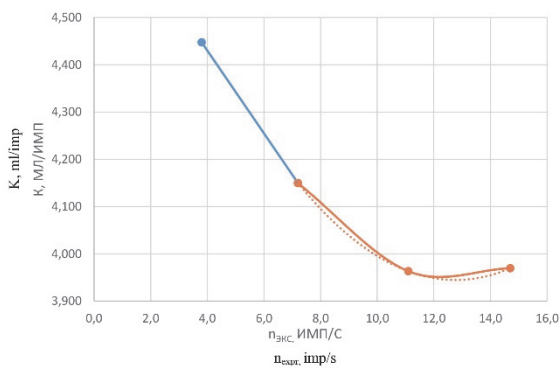


Рис. 4. Комбинация линейной и квадратичной функций [Figure 4. Combined line function and quadratic function]

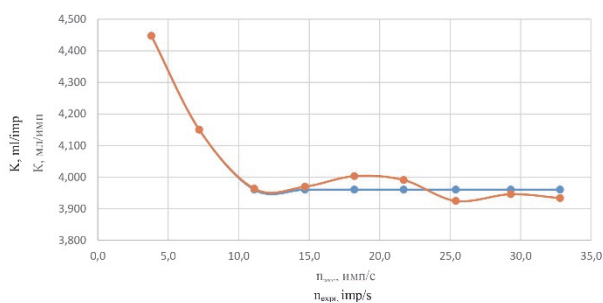


Рис. 5. Результат моделирования [Figure 5. Simulation data]

Из полученных зависимостей (2) и (3) были составлены условия расчета цены импульса K и расхода Q , после чего был выполнен расчет с применением данной модели. В результате были построены графики зависимости погрешностей измерений счетчика, показаний, сделанных расчетным методом, и показаний, выполненных с помощью модели относительно эталонного расхода для наглядного их сравнения (рис. 6.). Как видно из графика на рис. 6. погрешность расчета при помощи модели соответствует допустимым зна-

чениям и не превышает 1 %, что свидетельствует о работоспособности модели.

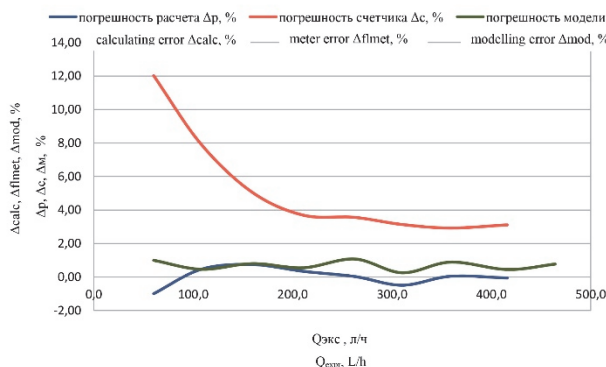


Рис. 6. Сравнение погрешностей счетчика, расчета и модели [Figure 6. Comparative analysis of the measuring accuracy of the meter, calculation and mathematical model]

6. Проверка работоспособности системы

Для подтверждения полученных данных был проведен эксперимент, порядок проведения которого описан в разделе «Методика поверки». Однако в уже имеющуюся программу поверки в среде ZetView были добавлены компоненты, которые позволили вносить необходимую коррекцию при измерении расхода в реальном времени. Пример рабочих элементов приложения для одного из участков диапазона измерения показан на рис. 8.

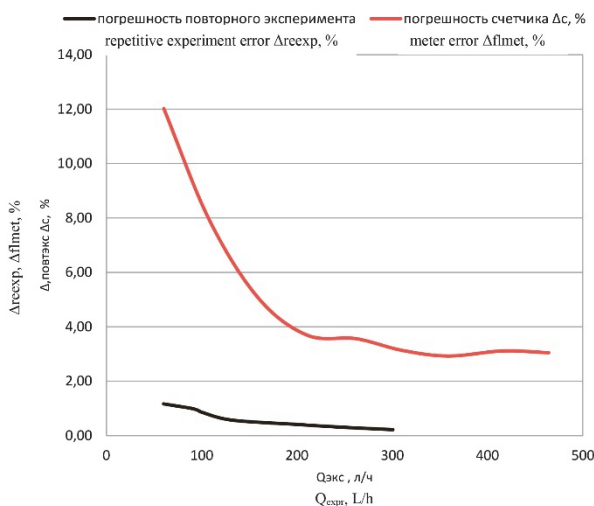


Рис. 7. Сравнение погрешностей счетчика и разработанной системы [Figure 7. Comparative analysis of the measuring accuracy of acoustic meter and created system]

По результатам проведенных экспериментов были получены данные, которые позволили опре-

делить отклонение значений расхода с учетом примененной рабочей программы от эталонных значений в реальном времени.

После этого были построены графики зависимости погрешностей измерений счетчика и

измерений, сделанных расчетным методом при помощи модели относительно эталонного расхода. Как видно из графика, представленного на рис. 7, отклонение расчетного расхода от экспериментального не превысило 1 %.

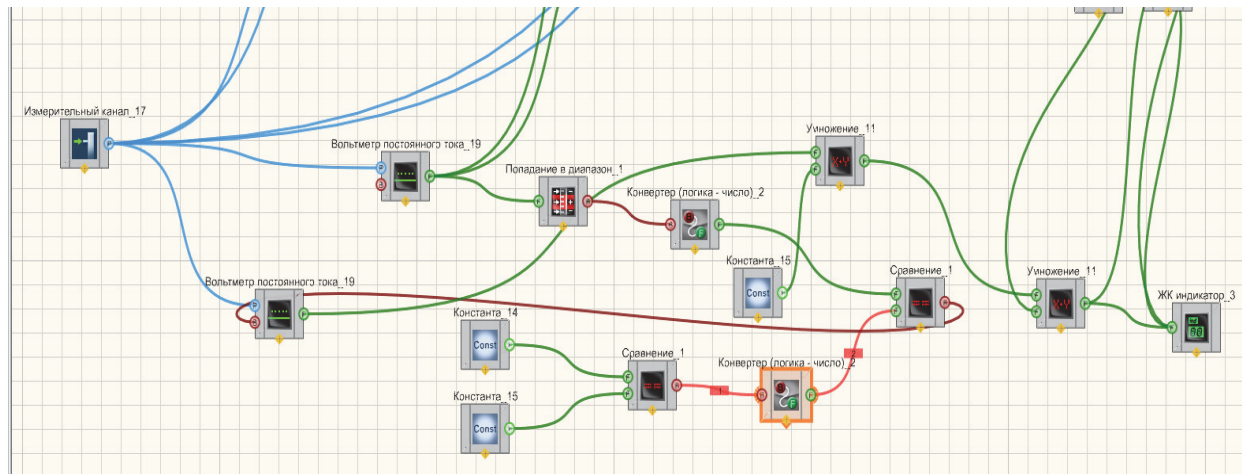


Рис. 8. Рабочие элементы участка диапазона измерения
[Figure 8. Elements of the measurement range]

Заключение

В ходе проведения экспериментального исследования были достигнуты следующие результаты:

- 1) подтверждена поставленная в начале эксперимента теория;
- 2) проведен сбор статистических данных об отклонениях измерений счетчика-расходомера при различных режимах потока;
- 3) проведен сбор статистических данных значений цены импульса K с целью формирования диапазонов для работы счетчика-расходомера при различных режимах потока;
- 4) разработаны алгоритмы коррекции измерения расхода;
- 5) подтверждена работоспособность системы.

Можно с уверенностью заявить, что данная разработка позволяет расширить диапазон оптимальных значений расхода для акустических расходомеров, а также минимизировать погрешности измерения во время работы в любом диапазоне, заявленном производителем в паспорте прибора.

Список литературы

1. Ультразвуковые расходомеры. URL: <http://npropramen.ru/>

2. Digulescu A., Petrut T., Candel I., Bunea F., Dunca G., Bucur D., Ioana C., Serbanescu A. On the vortex parameter estimation using wide band signals in active acoustic systems // 2014 IEEE Oceans Conference, Taipei. doi: 10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964552

3. Zhang L., Meng T., Wang C., Hu H.M., Qin C.L. Probe installation effects on the accuracy of feed thru ultrasonic flowmeters // Chinese Journal of Scientific Instrument. 2012. Vol. 33. No. 10. Pp. 2307–2314.

4. Zheng D., Zhang P., Xu T. Effect of installation position of ultrasonic flowmeter probe on flow measurement // Journal of Mechanical Engineering. 2011. Vol. 47. No. 12. Pp. 13–18.

5. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник: кн. 2 / под общ. ред. Е.А. Шорникова. 4-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1989. 701 с.

6. Ca2.833.021 РЭ. Счетчик акустический AC-001: руководство по эксплуатации. С. 10. URL: <http://www.staroruspribor.ru/files/catalog/gallery/700/782/17.pdf>

7. Zhang P.-Y., Zheng D.-D., Xu T.-S., Zhang L.-X., Hu H.-M. Study on the influence of ultrasonic probes on flow field and measurement performance of ultrasonic flowmeter // Journal of Experiments in Fluid Mechanics. 2011. Vol. 25. No. 3. Pp. 60–65.

8. Фафурин В.А., Галеев М.К. Расчет корректирующего коэффициента ультразвукового расходомера // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 23. С. 152–156.

9. Биргер Г.И. Некоторые вопросы градуировки ультразвуковых расходомеров // Измерительная техника. 1962. № 10. С. 53–55.

10. ЗТМС.05000-01 34 РО. SCADA ZETView: руководство пользователя. ЗАО «ЭТМС», 2013. С. 22.

11. Счетчик акустический АС-001. Методика поверки ЦПП9-0.00.00ИМ. С. 8. URL: <http://www.staroruspribor.ru/files/catalog/gallery/700/782/16.pdf>

12. Бирюков Б.В., Данилов М.А., Кивилис С.С. Средства испытания расходомеров. М.: Энергоатомиздат, 1983. 112 с.

13. Бессонов А.А., Свердлов Л.З. Методы статистического анализа погрешностей устройств автоматики. Л.: Энергия, 1974. 144 с.

Для цитирования

Лапин М.В., Гринин А.О., Шкарин К.В., Сури К. Обеспечение работоспособности акустических расходомеров вне пределов оптимальных значений расхода жидкости // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 147–154. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-147-154>

Research paper

Acoustic flow meter performance assurance outside the limits of measurement

Mikhail V. Lapin, Andrey O. Grinin, Kirill V. Shkarin, Kambiz Soury

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

Article history:

Received: April 19, 2019

Revised: June 20, 2019

Accepted: June 28, 2019

Keywords:

acoustic flow meter; measuring accuracy, outside of design conditions; measuring span enhancement

Article is dedicated to liquid flow measuring by acoustic flow meters. Manufacturers establish the allowable measurement range (nominal), within which the measurement error is minimal, that's why their measuring span is limited, and the measurement error when operating in off-design modes is unacceptable. The basic task of this research is to expand the range of flow measurements of acoustic liquid meters. V.A. Fafurin and M.K. Galeev in their work "Calculation of the correction coefficient of the ultrasonic flow meter" have already considered the problem of measuring the flow rate of acoustic devices. In their study was presented a method for calculating the correction coefficient, which depended on the flow regime in the pipe. But this technology is applicable for change-less flow regime pipes. In this article, the authors propose to use a coefficient that has a functional dependence on the magnitude of the flow, obtained empirically. The article describes the stages of the study: the method of calibration of the device, methods of analysis and processing of verification data by PC, the algorithm of measurement system implementation in power engineering equipment, system performance check. The system presented in the article allows to expand the range. The proposed model will be useful for enterprises.

References

1. Ultrasonic flow meters. <http://npopramen.ru/>
2. Digulescu A, Petrut T, Candel I, Bunea F, Dunca G, Bucur D, Ioana C, Serbanescu A. On the vortex parameter estimation using wide band signals in active acoustic systems. *IEEE Oceans Conference, Taipei, 2014*. Available from: doi: 10.1109/OCEANS-TAIEI.2014.6964552.

Mikhail V. Lapin – 2nd year master's student at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering, Academy of Engineering; alo14@yandex.ru

Andrey O. Grinin – 2nd year master's student at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering, Academy of Engineering.

Kirill V. Shkarin – assistant at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering, Academy of Engineering.

Kambiz Soury – assistant at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering, Academy of Engineering.

3. Zhang L, Meng T, Wang C, Hu HM, Qin CL. Probe installation effects on the accuracy of feed thru ultrasonic flowmeters. *Chinese Journal of Scientific Instrument*. 2012;33(10): 2307–2314.

4. Zheng D, Zhang P, Xu T. Effect of installation position of ultrasonic flowmeter probe on flow measurement. *Journal of Mechanical Engineering*. 2011;47(12): 13–18.

5. Kremlevskiy PP. *Raskhodometry i schyotchiki kolichestva veschestv: spravochnik: kn. 2. 4-e izd. [Flowmeters and counters of substances: directory: book 2. 4th ed]*. Leningrad: Mashinostroenie Publ., Leningradskoe otdelenie; 1989. (In Russ.)

6. Ca2.833.021 RE. Schyotchik akusticheskij AC-001: rukovodstvo po ekspluatacii [*Acoustic meter AC-001: manu-*

a/]. p. 10. Available from: <http://www.staroruspribor.ru/files/catalog/gallery/700/782/17.pdf>. (In Russ.)

7. Zhang P-Y, Zheng D-D, Xu T-S, Zhang L-X, Hu H-M. Study on the influence of ultrasonic probes on flow field and measurement performance of ultrasonic flowmeter. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*. 2011;25(3): 60–65.

8. Fafurin VA, Galeev MK. Raschet korrekturnykh koeffitsientov ultrazvukovogo raskhodomera [Calculation of the correction coefficient of the ultrasonic flow meter]. *Vestnik Kazanskogo technologicheskogo universiteta*. 2011;(23): 152–156. (In Russ.)

9. Birger GI. Nekotorye voprosy graduirovki ultrazvukovykh raskhodomerov [Questions on graduation of ultrasonic flow meters]. *Measuring equipment*. 1962;(10): 53–55. (In Russ.)

10. ZTMS.05000-01 34 RO. *SCADA ZETView: rukovodstvo pol'zovatelya* [SCADA ZETView: Manual]. ETMS Company; 2013. p. 22. (In Russ.)

11. *Schyotchik akusticheskij AC-001. Metodika poverki TsPP9-0.00.00IM* [Acoustic meter AC-001. Calibration procedure TsPP9-0.00.00IM]. p. 8. Available from: <http://www.staroruspribor.ru/> (In Russ.)

12. Biryukov BV, Danilov MA, Kivilis SS. *Sredstva ispytaniya raskhodomerov* [Means Test Meters]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1983. (In Russ.)

13. Bessonov AA, Sverdlov LZ. *Metody statisticheskogo analiza pogreshnostej ustroystv avtomatiki* [Methods of statistical analysis of the automation devices errors]. Leningrad: Energiya Publ.; 1974.

For citation

Lapin MV, Grinin AO, Shkarin KV, Soury K. Acoustic flow meter performance assurance outside the limits of measurement. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 147–154. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-147-154>. (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-155-162
УДК 69.05

Научная статья

Техническое нормирование технологии устройства железобетонных плит перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей

Д.В. Топчий, А.С. Болотова, А.С. Воробьев, А.В. Атаманенко

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 18 февраля 2019

Доработана: 20 апреля 2019

Принята к публикации: 26 апреля 2019

Ключевые слова:

техническое нормирование; неизвлекаемые вкладыши-пустотообразователи; норма времени; производственные нормы

Технически обоснованные нормы времени и нормы выработки призваны способствовать повышению эффективности производства, улучшению технико-экономических показателей строительных предприятий, своевременному вводу в эксплуатацию возводимых зданий и сооружений, а также обеспечению правильной организации заработной платы рабочих. Нормативы трудозатрат используются при определении потребности в строительных машинах и оборудовании, необходимой численности рабочих, а также служат основой для разработки сетевых и календарных графиков, которые являются частью проекта организации строительства и проекта производства работ. Нормы времени и нормы выработки для большинства строительных работ содержатся в сборниках единых норм и расценок и государственных элементных сметных норм. Однако в условиях постоянного развития и внедрения новых технологий производства работ появляется необходимость актуализации и доработки существующей базы данных технического нормирования. Нормы времени, соответствующие современному уровню технического развития и отражающие передовой опыт рабочих, позволяют производить правильный выбор при анализе наиболее экономичных способов производства работ. Определение и выведение производственных нормативов заключается в определении средневзвешенного количества рабочего времени для выполнения определенной технологической операции, при этом обязательно учитываются условия производства данного рабочего процесса, численный и квалификационный состав рабочих.

Введение

Нормативы затрат труда служат важнейшим инструментом управления производственными

процессами, планирования и контроля за своевременным выполнением всех видов строительно-монтажных работ и в конечном счете способствуют ускорению и снижению стоимости строительства.

На сегодняшний день в нормативной документации практически полностью отсутствует информация по технологии производства железобетонных плит перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей. Также нет данных по таким показателям, как состав работ по данной технологии (деление на простые технологические операции), норма времени на конечный измеритель продукции (по примеру единых

Топчий Дмитрий Владимирович – доцент кафедры технологий и организации строительного производства, кандидат технических наук.

Болотова Алина Сергеевна – доцент кафедры технологий и организации строительного производства, кандидат технических наук.

Воробьев Алексей Сергеевич – студент-магистрант 1-го курса, направление подготовки «Технология и организация строительного производства» (08.04.01); alexey982010@mail.ru

Атаманенко Алевтина Васильевна – студент-магистрант 1-го курса, направление подготовки «Технология и организация строительного производства» (08.04.01); atamanenko@mail.ru

© Топчий Д.В., Болотова А.С., Воробьев А.С., Атаманенко А.В., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

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



норм и расценок (ЕНиР) и государственных элементных сметных норм (ГЭСН)), состав и разряд звена рабочих-строителей, задействованных в производстве. В связи с этим в данной статье рассмотрены результаты исследования применения методов технического нормирования труда в строительстве для определения и выведения производственных норм затрат труда для технологии устройства железобетонных плит перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей.

1. Методы

В процессе определения и выведения производственных нормативов затраты рабочего времени были разделены на две группы: нормируемые и ненормируемые затраты времени.

Разработка производственных норм производилась с использованием методов технического нормирования. Данные методы предусматривают разработку норм посредством детализированного рассмотрения строительного процесса, исследования во всех отношениях производственных возможностей и резервов с учетом применения новейшего строительного оборудования и обоснованных методов производства работ.

Применение такого подхода позволяет выявить и установить наиболее эффективные методы производства работ, в связи с этим каждая техническая норма должна составляться на основе нормали, то есть характеристики, в которой дается описание производимых работ и требований к их качеству, применяемого строительного оборудования и материалов, состава строительного процесса и рациональных методов работ.

Основная задача нормали – уточнить и зафиксировать наиболее соответствующую конъюнктуру для выполнения строительного процесса. Нормаль подробно описывает характерные условия строительной площадки, для которых были определены соответствующие нормы времени, и служит важным инструментом для их выполнения посредством использования рабочими новейших способов производства работ [1; 2].

2. Исследование

В проведенном исследовании нормирование технологического процесса начиналось с подробного ознакомления со спецификой технологии выполнения работ по устройству монолитных желе-

зобетонных плит с пустотообразователями, изучения технических условий на приемку и производство работ, правил охраны труда и техники безопасности, рабочих чертежей комплекта КЖ (конструкции железобетонные), а также действующих производственных норм на аналогичные или близкие по характеру работы.

Объектом наблюдений являлась монолитная железобетонная плита перекрытия с применением вкладышей-пустотообразователей на отметке +15,950 общей площадью 2340 м². Толщина плиты 250 мм. Объект – многофункциональная комплексная жилая застройка с подземной автостоянкой.

В целях технического учета весь технологический процесс был разделен на элементарные технологические операции, представленные в сборниках ЕНиР 4-1 и ЕНир 1-7 [3–5]. К ним относятся: подача опалубки горизонтальных конструкций; монтаж опалубки горизонтальных конструкций; подача арматуры горизонтальных конструкций; устройство арматурного каркаса путем вязки из отдельных стержней (совместно верхняя и нижняя зоны армирования); приемка бетонной смеси для устройства горизонтальных конструкций; подача бетонной смеси для горизонтальных конструкций; укладка бетонной смеси в горизонтальную конструкцию; демонтаж опалубки горизонтальных конструкций.

Учитывая конструктивные особенности плиты перекрытия, проводилось хронометражное исследование технологических операций, данные по которым в нормативных документах отсутствуют. К ним относятся: сборка составных частей пустотообразователя; сборка пустотообразователей в линейный модуль; подача собранных модулей на монтажный горизонт краном; установка модулей в состав арматурного каркаса плиты перекрытия.

Инженерно-геодезические работы по вынесению разбивочных осей для установки линейных модулей в состав конструкций в данном исследовании не участвуют.

В ходе наблюдений строго соблюдались следующие условия: соответствие технологии производства работ нормали процесса; учет времени по двум основным категориям – нормируемым затратам времени (в том числе учет времени на подготовительно-заключительную работу, отдых и личные надобности) и ненормируемым затратам (потерям рабочего времени).

Таблица 1

Карточка-определитель работ

№ п.п.	Наименование работы	Состав работы	Численный и квалификационный состав рабочих	Объем, м ²
1	Сборка составных частей пустотообразователя	1. Сборка вспомогательного шаблона. 2. Соединение двух половинок в один пустотообразователь при помощи шаблона	Число рабочих в бригаде (звене) – 1 чел.: арматурщик 2"	100
2	Сборка пустотообразователей в линейные модули	1. Сборка элементов арматурного каркаса с предварительным помещением внутрь целых (собранных) пустотообразователей, контроль геометрических параметров каркаса. 2. Сварка (вязка) узлов арматурного каркаса модуля	Число рабочих в бригаде (звене) – 1 чел.: арматурщик 2"	100
3	Подача собранных модулей в штабелях на монтажный горизонт краном	1. Зацепка груза (строповка). 2. Подъем или опускание груза. 3. Поворот стрелы. 4. Передвижение крана или изменение вылета стрелы с грузом (перемещение грузовой тележки). 5. Установка груза на рабочее место. 6. Отцепка груза. 7. Возврат к месту загрузки. 8. Смена траверс или строп	Число рабочих в бригаде (звене) – 2 чел.: машинист 5" – 1 чел., такелажник 4" – 1 чел.	100
4	Установка модулей в состав арматурного каркаса плиты перекрытия	1. Раскладка модулей в соответствии с планом и геодезической разбивкой. 2. Закрепление модулей к арматуре нижней зоны (вязальная проволока). 3. Установка закладных деталей (или плоских каркасов). 4. Закрепление модулей к арматуре верхней зоны (вязальная проволока)	Число рабочих в бригаде (звене) – 1 чел.: арматурщик 2"	100

Table 1

The work identification card

No.	Job title	Composition of work	Numerical and qualification composition of workers	Volume, m ²
1	Assembly of components of a void former	1. Build an auxiliary template. 2. Connecting the two halves into one core former using a template	The number of workers in the brigade (link) – 1 person: the fitter 2"	100
2	Assembly of void formers in linear modules	1. Assembly of elements of a reinforcing framework with the preliminary room in the whole (collected) void formers, control of geometrical parameters of a framework. 2. Welding (knitting) of knots of a reinforcing framework of the module	Number of workers in team (link) – 1 person: the fitter 2"	100
3	Giving of assembled modules in stacks on the assembly horizon by the crane	1. Freight catch (strapping). 2. Rise or lowering of freight. 3. Turn of an arrow. 4. Movement of the crane or change of a departure of an arrow with freight (movement of the cargo cart). 5. Installation of freight on a workplace. 6. Unhooking of freight. 7. Return to the place of loading. 8. Change traverse or sling	Number of workers in team (link) – 2 persons: the driver 5" – 1 person, the scaffold worker 4" – 1 person	100
4	Installation of modules in structure of a reinforcing framework of a plate of overlapping	1. An apportion of modules according to the plan and geodetic breakdown. 2. Fixing of modules to fittings of the lower zone (a knitting wire). 3. Installation of embedded parts (or flat frameworks). 4. Fixing of modules to fittings of the top zone (knitting wire)	Number of workers in team (link) – 1 person: the fitter 2"	100

После детального изучения технологии устройства железобетонных плит перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей для производственных процессов, отсутствующих в сборниках ЕНиР, были определены состав работ и оптимальный состав звена рабочих, представленные в табл. 1 [6–8]. Определение состава работ и оптимального состава звена рабочих производилось на основе применения принципа критического использования исходных данных, то есть данные принимались после тщательного анализа с точки зрения надежности, рационального использования рабочего времени и полноты охвата всех элементов нормируемого процесса и основных факторов, влияющих на его трудоемкость. Объемы работ определены исходя из потребного количества соответствующих изделий на 100 м² перекрытия.

Далее проводились хронометражные наблюдения за каждой технологической операцией. Продолжительность элементов технологического процесса устройства монолитных железобетонных плит перекрытия с вкладышами-пустотообразователями измерена с помощью секундомера с учетом затрат

времени с точностью до 0,2–1 с. Произведено 15 измерений методом выборочного хронометража для нормирования циклических (повторяющихся) операций [9–10]. Данные наблюдений по каждой работе занесены в карту хронометражных наблюдений и представлены в табл. 2.

3. Обработка данных

По окончании измерений затраченного на производство работ времени использовался метод циклической обработки для рассмотрения и анализа итогов хронометражных наблюдений и технического учета. Для оценки величины разброса результатов наблюдений при хронометражном исследовании был определен и также внесен в табл. 2 так называемый коэффициент устойчивости хронометражного ряда [11], который определяется по формуле

$$K_y = t_{\max}/t_{\min}, \quad (1)$$

где K_y – коэффициент устойчивости; t_{\max} , t_{\min} – максимальное и минимальное значение хронометражного ряда соответственно.

Таблица 2

Карта технического учета работ
[Table 2. Map of technical accounting works]

№ наблюдения [No. of observation]	Продолжительность технологических операций устройства монолитных железобетонных плит перекрытия с пустотообразователями [Duration of technological operations of the device of monolithic reinforced concrete plates of overlapping with void formers]				
	Сборка составных частей пустотообразователя [Assembly of components of a void former]	Сборка пустотообразователей в линейные модули [Assembly of void formers in linear modules]	Подача собранных модулей в штабелях на монтажный горизонт краном [Giving of assembled modules in stacks on the assembly horizon by the crane]	Установка модулей в состав арматурного каркаса плиты перекрытия [Installation of modules in structure of a reinforcing framework of a plate of overlapping]	
	P*, чел./ч [man/h]	P, чел./ч [man/h]	P, чел./ч [man/h]	M**, маш./ч [mach./h]	P, чел./ч [man/h]
1	12,667	4,289	0,350	0,350	9,006
2	15,000	4,097	0,383	0,383	8,905
3	15,833	4,788	0,467	0,467	8,496
4	13,000	5,276	0,433	0,433	8,878
5	16,333	4,402	0,383	0,383	9,454
6	16,000	4,581	0,450	0,450	8,739
7	13,083	3,890	0,417	0,417	8,445
8	14,317	3,850	0,417	0,417	9,038
9	14,000	4,623	0,350	0,350	9,715
10	15,917	4,389	0,367	0,367	9,166
11	17,850	4,172	0,417	0,417	9,548
12	13,550	4,055	0,367	0,367	8,591
13	14,683	4,275	0,383	0,383	9,325
14	13,167	4,506	0,450	0,450	9,305
15	15,450	4,828	0,433	0,433	8,719
K_y	1,35	1,37	1,33	1,33	1,15

Примечания: * – нормируемые затраты труда рабочего времени; ** – нормируемые затраты труда машинистов (нормируемые затраты времени работы машин).

Результаты хронометражных измерений, резко отличающиеся величиной продолжительности элементов операций, были исключены из хронометражного ряда. Это связано, как правило, с непредвиденными факторами изменения условий, спровоцированными отклонениями отдельных элементов процесса производства работ от нормы.

При исключении отличающихся значений продолжительности из хронометражного ряда были учтены следующие положения [12; 13]:

1) если $K_y \leq 1,3$, ряд не требует проверки;

2) если $1,3 \leq K_y \leq 2$, требуется использовать метод граничных значений для анализа и очистки ряда, применяя следующие формулы [14]:

$$a_n \leq \frac{\sum a_i - a_n}{n-1} + Klim(a_{n-1} - a_l), \quad (2)$$

$$a_l \geq \frac{\sum a_i - a_l}{n-1} + Klim(a_n - a_l), \quad (3)$$

где a_n – максимальное значение продолжительности в ряду; a_l – минимальное значение продолжительности в ряду; $\sum a_i$ – сумма значений ряда; n – количество значений в ряду; $Klim$ – коэффициент, зависящий от количества значений в ряду, принимается по табл. 3;

3) если $K_y > 2$, для проверки и очистки ряда применяется метод определения относительной среднеквадратической ошибки [15; 16] (исходя из значений табл. 2, данный метод не используется при расчетах).

Как видно из табл. 2, значение коэффициента устойчивости хронометражного ряда для технологических операций № 1, 2, 3 попадает под положение № 2, где $1,3 \leq K_y \leq 2$, а следовательно,

но, необходимо провести очистку хронометражных рядов с помощью формул (2) и (3).

Для технологической операции № 1 «Сборка составных частей пустотообразователя» величина граничного значения, вычисленного по формуле (2), составляет

$$a_n \leq \frac{219,983 - 17,850}{14} + 0,9(16,333 - 12,667) = 17,737.$$

Число $17,850 > 17,737$, следовательно, оно исключается из хронометражного ряда.

Для технологической операции № 2 «Сборка пустотообразователей в линейные модули» величина граничного значения, вычисленного по формуле (2), составляет

$$a_n \leq \frac{66,021 - 5,276}{14} + 0,9(4,828 - 3,850) = 5,219.$$

Число $5,276 > 5,219$, следовательно, оно исключается из хронометражного ряда.

Для технологической операции № 3 «Подача собранных модулей на монтажный горизонт краном» величина граничного значения, вычисленного по формуле (2), составляет

$$a_n \leq \frac{5,01 - 0,467}{14} + 0,9(0,450 - 0,350) = 0,415.$$

Число $0,467 > 0,415$, следовательно, оно исключается из хронометражного ряда.

Таким образом, в ходе исследования были получены экспериментальные значения продолжительности технологических операций, а также проведен анализ данных, при котором были выявлены и исключены лишние замеры, не соответствующие характеристикам устойчивости хронометражного ряда.

Таблица 3

Ряд граничных значений
[Table 3. A series of boundary values]

Количество значений в ряду, кроме проверяющего [Amount of values in a row, except checking]	4	5	6	7–8	9–10	11–15	16–30	31–50
<i>Klim</i>	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7

Таблица 4

Средняя продолжительность и процентное соотношение технологических операций
[Table 4. Average duration and percentage of technological operations]

№ п.п. [No.]	Технологические процессы и операции [Technological processes and operations]	t_{cp}	Процентное соотношение [Percentage]
1	Сборка составных частей пустотообразователя [Assembly of components of a void former]	14,50	9,52 %
2	Сборка пустотообразователей в линейные модули [Assembly of void formers in linear modules]	4,34	2,85 %
3	Подача собранных модулей в штабелях на монтажный горизонт краном [Giving of assembled modules in stacks on the assembly horizon by the crane]	0,40	0,26 %
		0,40	0,26 %
4	Установка модулей в состав арматурного каркаса плиты перекрытия [Installation of modules in structure of a reinforcing framework of a plate of overlapping]	9,02	5,92 %

Показателем средних затрат труда на выполнение процесса является среднее арифметическое значение хронометражного ряда после его очистки, определяемое по формуле

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum t_i}{\sum n}, \quad (4)$$

где $\sum t_i$ – суммарная продолжительность всех элементов после очистки ряда; n – количество циклов в очищенном ряду.

Результаты средней продолжительности, а также процентное влияние составляющих комплексный процесс технологических операций представлены в табл. 4.

Заключение

В процессе исследования всех технологических операций было выявлено, что совместные трудозатраты на комплексный технологический процесс составляют 152,34 чел./ч, в том числе затраты труда машинистов (затраты времени работы машин) 2,288 чел./ч (маш./ч).

Таким образом, в ходе исследования были разработаны и экспериментально исследованы параметры технологических операций, проведены хронометражные наблюдения с целью проектирования производственных норм по заданной технологии.

Список литературы

1. *Трамбовецкий В.П.* Новые подходы к технологии бетона и перспективы ее развития // *Технологии бетонов*. 2013. № 4. С. 37–39.
2. *Бугаевский С.А.* Современные облегченные железобетонные перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей // *Научный вiсник будiвництва*. 2015. № 3. С. 73.
3. ЕНиР. Сборник Е4. Монтаж сборных и устройство монолитных железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1987.
4. ЕНиР. Сборник Е1. Внутрипостроечные транспортные работы. М.: Стройиздат, 1987.
5. *Болотова А.С., Кириухин С.А.* Разработка модели бизнес-процесса контроля качества монолитных бетонных работ // *Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. докл. XIX межд. науч.-практической конференции / Министерство образования и науки Российской Федерации, Московский гос. строит. ун-т*. М.: МГСУ, 2016. С. 649–651.

6. *Ланидус А.А.* Потенциал эффективности организационно-технологических решений строительного объекта // *Вестник МГСУ*. 2014. № 1. С. 175–180.

7. *Либерман И.А.* Техническое нормирование, оплата труда и проектно-сметное дело в строительстве: учебник. М.: Инфра-М, 2010. С. 76–80.

8. *Ланидус А.А., Теличенко В.И., Терентьев О.М.* Технология строительных процессов: учебник для строительных специальностей вузов. Т. 1. М., 2002.

9. ГЭСН 81-02-06-2001. Государственные элементные строительные нормы на строительные работы. Сборник 6. Бетонные и железобетонные конструкции монолитные. М., 2000.

10. *Болотова А.С., Трескина Г.Е.* Исследование технологических особенностей монолитного строительства на основе системного анализа // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 2 (55). С. 176–183.

11. *Топчий Д.В., Токарский А.Я.* Повышение организационно-технологической надежности объектов перепрофилирования при осуществлении строительного надзора // *Наука и бизнес*. 2017. № 10 (76). С. 15–19.

12. *Топчий Д.В.* Оценка организационно-технологических и экономических параметров при выводе предприятий за пределы городской черты // *Технология и организация строительного производства*. 2015. № 4–1. С. 34–41.

13. Cobiax Technologies AG. URL: <http://www.cobiax.com/technology>

14. *Гинзбург А.В.* Информационная модель жизненного цикла строительного объекта // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 9. С. 61–65.

15. *Топчий Д.В.* Комплексный строительный надзор: требования и необходимость // *Технология и организация строительного производства*. 2014. № 1. С. 46–47.

16. *Леонович С.Н., Передков И.И.* Технология устройства облегченными пустообразователями железобетонных плит перекрытия с предварительным напряжением арматуры в построечных условиях. 2015. № 6. С. 54–62.

Для цитирования

Топчий Д.В., Болотова А.С., Воробьев А.С., Атаманенко А.В. Техническое нормирование технологии устройства железобетонных плит перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 2. С. 155–162. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-155-162>

Technical rationing of the construction technology of reinforced concrete floor slabs using non-removable void formers

Dmitry V. Topchiy, Alina S. Bolotova, Aleksey S. Vorobev, Alevtina V. Atamanenko

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

Article history:

Received: February 18, 2019

Revised: April 20, 2019

Accepted: April 26, 2019

Keywords:

technical rationing; non-removable void-forming liners; holders; time rate; production norms

Technically sound standards of time and production standards are designed to improve production efficiency, technical and economic indicators of construction enterprises, timely commissioning of buildings and structures being erected, as well as ensuring the proper organization of workers' wages. Labor standards are used in determining the need for construction machinery and equipment, the required number of workers, and also serve as the basis for the development of network and calendar schedules that are part of the project of construction organization (PCO) and the project of construction production (PCP). Standards of time and standards for the production of most of the construction work are contained in the collections of common norms and rates and state elemental estimated norms. However, in the conditions of continuous development and introduction of new production technologies, there is a need to update and refine the existing technical regulation database. Standards of time, corresponding to the modern level of technical development and reflecting the advanced experience of workers, allow to make the right choice when analyzing the most economical ways of producing work. Definition and removal of production standards is to determine the weighted average number of working hours to perform a particular technological operation, while taking into account the conditions of production of this workflow, the numerical and qualification composition of workers.

References

1. Trambovetskiy VP. Novye podkhody k tekhnologii betona i perspektivy ee razvitiya [New approaches to technology of concrete and prospect of its development]. *Technologies of concrete*. 2013;(4): 37–39. (In Russ.)

2. Bugaevskiy SA. Sovremennye oblegchennye zhelezobetonnye perekrytiya s primeneniem neizvlekaemykh vkladyshey-pustotoobrazovatelyey [The modern facilitated reinforced concrete overlappings with application of not taken inserts void formers]. *Naukoviy visnik budivnistva*. 2015;(3): 73. (In Russ.)

3. ENiR [Uniform norms and quotations on construction, assembly and repair construction works]. *Sbornik E4. Montazh sbornyykh i ustroystvo monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksii [Collection E4. Installation of precast and monolithic reinforced concrete structures]*. Moscow: Stroiizdat Publ.; 1987. (In Russ.)

4. ENiR [Uniform norms and quotations on construction, assembly and repair construction works]. *Sbornik E1. Vnutripostroechnye transportnye raboty [Collection E1. Intra-construction transport works]*. Moscow: Stroiizdat Publ.; 1987. (In Russ.)

5. Bolotova AS, Kiryuhin SA. Razrabotka modeli biznes-processa kontrolya kachestva monolitnykh betonnykh rabot [Development of a model of the business process quality control of monolithic concrete work]. *Stroitel'stvo – formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti: sb. dokladov XIX Mezhd. nauchno-prakticheskoy konferencii [Construction – the formation of a living environment: Collection of reports of the 19th International Scientific and Practical Conference]*. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2016. pp. 649–651. (In Russ.)

6. Lapidus AA. Potencial jeffektivnosti organizatsionno-tehnologicheskikh reshenij stroitel'nogo obekta [Potential of efficiency of organizational technology solutions of a construction object]. *Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture*. 2014;(1): 175–180. (In Russ.)

7. Liberman IA. Tekhnicheskoe normirovanie, oplata truda i proektno-smetnoe delo v stroitel'stve [Technical rationing, compensation and design and budget matter in construction]. Moscow: Infra-M Publ.; 2010. pp. 39–40. (In Russ.)

Dmitry V. Topchiy – Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production, PhD in Engineering.

Alina S. Bolotova – Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production, PhD in Engineering.

Aleksey S. Vorobev – master student of the 1st year, direction of studying “Technology and organization of construction production”; alexey982010@mail.ru

Alevtina V. Atamanenko – master student of the 1st year, direction of studying “Technology and organization of construction production”; atamanenko@mail.ru

8. Lapidus AA, Telichenko VI, Terent'ev OM. (eds.) *Tehnologija stroitel'nyh processov: uchebnik dlja stroitel'nyh special'nostej vuzov* [Technology of construction processes: Textbook for construction specialties of universities]. Moscow; 2002. (In Russ.)
9. GESN-2001. Gosudarstvennyye elementnyye stroitel'nyye normy na stroitel'nyye raboty [State elemental construction standards for construction work]. *Sbornik 6. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii monolitnye* [Collection 6. Concrete and reinforced concrete structures monolithic]. Moscow; 2000. (In Russ.)
10. Bolotova AS, Treskina GE. Issledovanie tehnologicheskikh osobennostej monolitnogo stroitel'stva na osnove sistemnogo analiza [Research of technological features monolithic construction on the basis of system analysis]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. English version appendix*. 2016;2(55): 176–183. (In Russ.)
11. Topchiy DV, Tokarsky AYa. Increase in organizational and technological reliability of subjects to conversion at implementation of construction supervision [Increase in organizational and technological reliability of subjects to conversion at implementation of construction supervision]. *Journal Science and Business*. 2017;10(76): 15–19. (In Russ.)
12. Topchiy DV. Otsenka organizatsionno-tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh parametrov pri vyvode predpriyatij za predely gorodskoy cherty [Assessment of organizational and technological and economic parameters at a conclusion of the enterprises out of limits of city line] *Tehnologija i organizacija stroitel'nogo proizvodstva*. 2015;(4–1): 34–31. (In Russ.)
13. Cobiax Technologies AG. Available from: <http://www.cobiax.com/technology> (Accessed 10 January 2019). (In Russ.)
14. Ginzburg AV. Informatsionnaya model' zhiznennogo tsikla stroitel'nogo ob'ekta [Information model of the life cycle of the construction object]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016;(9): 61–65. (In Russ.)
15. Topchiy DV. Kompleksnyj stroitel'nyj nadzor: trebovaniya i neobhodimost' [Complex construction supervision: requirements and need]. *Tehnologija i organizacija stroitel'nogo proizvodstva*. 2014;(1): 46–47. (In Russ.)
16. Leonovich SN, Peredkov II. Tekhnologiya ustroystva oblegchennymi pustobrazovatelyami zhelezobetonnykh plit perekrytiya s predvaritel'nym napryazheniyem armatury v postroechnykh usloviyakh [The technology of the device of reinforced concrete floor slabs using lightweight void formers with a prestressing of reinforcement in construction conditions]. *Nauka i tehnika*. 2015;(6): 54–62. (In Russ.)

For citation

Topchiy DV, Bolotova AS, Vorobev AS, Atamanenko AV. Technical rationing of the construction technology of reinforced concrete floor slabs using non-removable void formers. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 155–162. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-155-162>. (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173

УДК 624.074.5

Научная статья

Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи

А.В. Голиков, Е.А. Михальчонок

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 18 апреля 2019

Доработана: 02 июня 2019

Принята к публикации: 07 июня 2019

Ключевые слова:

решетчатые башни; конструктивная форма; геометрические размеры; напряженно-деформированное состояние; группы предельных состояний; металлоемкость; напряжения; деформации; рациональные соотношения размеров

Потребность в надежных опорах для размещения и поддержания оборудования сотовых операторов возрастает с каждым годом. Классическим вариантом опор являются решетчатые башни. В настоящее время большое значение приобретает оптимизация параметров решетчатых башен, которая является одним из путей повышения эффективности их проектирования и строительства. Целью работы выбрано определение рациональной конструктивной формы решетчатых башен сотовой связи. В работе выполнены расчет и анализ башенных опор призматической и пирамидальной форм при варьировании основных геометрических параметров сооружения и соотношении параметров между собой. Для создания основных зависимостей применены методы численного моделирования. По результатам критического анализа литературы по расчету решетчатых опор высотных сооружений установлено отсутствие рекомендуемых оптимальных значений геометрических параметров сооружений и соотношений между ними. Выполнена оценка напряженно-деформированного состояния расчетных моделей решетчатых башен призматической и пирамидальной форм при варьировании основных габаритных геометрических параметров сооружений. Для достижения поставленной цели по поиску рациональной конструктивной формы решетчатых опор опробованы и применены два критерия рационализации – одновременное выполнение требований обоих предельных состояний и минимизация массы сооружения. Результаты исследования решетчатых башенных опор представлены в безразмерных параметрах, что может быть использовано инженером при назначении габаритных размеров сооружения на начальном этапе проектирования.

Введение

Сооружения сотовой связи в жизни современного города играют исключительно важную роль по причине стремительно возрастающих объемов мобильного интернет-трафика. Это приводит к возрастанию необходимости установки в условиях плотной городской застройки новых опор, пред-

назначенных для размещения оборудования мобильных операторов. Классическим вариантом опор сотовой связи являются решетчатые башни.

При проектировании конструкций основное значение для заказчика в подавляющем большинстве случаев имеет стоимость конструкции в деле и срок выполнения работ. Указанные факторы зависят в большей степени от критериев эффективности проектных решений, за базовый из которых принимается металлоемкость сооружения. Именно поэтому важно правильно определить геометрические параметры и характеристики сечений элементов башни, напрямую влияющие на величину металлоемкости.

Цель работы – определение рациональной формы решетчатых башен сотовой связи.

Голиков Александр Владимирович – доцент кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений Института архитектуры и строительства, кандидат технических наук; alexandr_golikov@mail.ru
Михальчонок Елена Андреевна – магистрант кафедры строительных конструкций, оснований и надежности сооружений Института архитектуры и строительства.

© Голиков А.В., Михальчонок Е.А., 2019



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

Задачи:

- выполнить анализ опыта проектирования и конструктивных решений опор сотовой связи;
- провести классификацию решетчатых башен по характеру работы и конструктивной форме;
- выбрать критерии оптимизации конструктивной формы башен;
- исследовать работу решетчатых башен призматической формы и определить рациональные соотношения габаритных размеров сооружения по принятым критериям;
- исследовать работу решетчатых башен пирамидальной формы и определить рациональные соотношения габаритных размеров сооружения по принятым критериям.

1. Обзор опыта проектирования башен сотовой связи

Башня в качестве опоры сотовой связи представляет собой трех- или четырехгранное высотное сооружение. Как правило, между гранями достаточно места для размещения лестницы и площадок для обслуживания оборудования.

Отличительными особенностями рассматриваемых сооружений башенного типа являются значение соотношения основания и ее высоты, значительно превышающей размеры поперечного сечения в плане, а также незначительная масса технологического оборудования по сравнению с массой самой конструкции. Данные сооружения обладают рядом преимуществ, в частности, малой площадью застройки, отсутствием вант, расположенных над коммуникациями, большой надежностью при эксплуатации.

Башни можно классифицировать по:

- количеству граней: трех-, четырех- и многогранные башни;
- конфигурации: без переломов граней по высоте и с переломами граней;
- схеме решетки: с треугольной, ромбической и др.

Наибольшее распространение получили решетчатые четырехгранные башни пирамидальной формы. Трехгранные башни целесообразно применять в случаях, когда их высота и масса технологического оборудования невелики. Башни данного силуэта менее чувствительны к осадкам фундаментов. В свою очередь, многогранные башни применяются при значительной высоте сооружения и большой нагрузке от оборудования.

Соединительная решетка обеспечивает совместную работу поясов, воспринимая сдвиг от поперечной силы. Основные типы решеток для башен: треугольная, треугольная с распорками, ромбическая, крестовая, крестоворомбическая и полураскосная.

Работа призматических и пирамидальных башенных сооружений достаточно полно изучена в трудах таких ученых, как Е.И. Беленя [1711], В.В. Горев [2], М.П. Кондра [3], М.Б. Солодарь [4], Н.С. Стрелецкий [5], О.Е. Полынцев, А.А. Романчугов [6].

В зарубежной практике изучением работы башенных сооружений занимались следующие ученые: А. Khokakaki, P. Von Buelow [7], M. Pavan Kumar, P. Markankeya Raju, G. Tirupathi Naiku [8], J. Szafran, K. Juszcyk, M. Kamiński [9; 10], R. Axisa, M. Muscat, T. Sant, R.N. Farrugia [11], N. Mahesh, V. Ranga Rao [12], M. Tah Abdulaqder, M. Alsilevanai Kamiran, M. Özakça [13], а также ряд других ученых по всему миру [14–19].

2. Объект исследования и исходные данные

Объектом исследования данной работы являются призматические и пирамидальные башенные опоры сотовой связи, схема решетки – треугольная с распорками (рис. 1 и 2).

Расчеты выполнены на примере башни высотой $H = 42$ м, варьируемые величины приведены в табл. 1. Высота башен выбрана по устоявшемуся опыту проектирования опор сотовой связи в городской черте, для которых предельной является высота около 42 м. Проектирование осуществляется для III ветрового района, тип местности Б.

Приведенные в работе результаты представлены в относительных единицах и могут быть экстраполированы на башни других высот.

Таблица 1

Варьируемые величины для объектов исследования
[Table 1. Variable values for objects of study]

Наименование [Name]	Обозначение [Designation]	Призматические башни, м [Prismatic towers, m]	Пирамидальные башни, м [Pyramidal towers, m]
Расчетная ширина сооружения [Estimated width facilities]	b	1,7 2,8 4,0 5,0	4,5 4,8 5,3 7,3

В литературе [5] указан рекомендуемый диапазон соотношения основания башни и высоты: $1/6-1/15H$. Для пирамидальных башен ширина верха принимается равной 1–2 м из соображения возможности размещения на площадке человека. Уклон

граней принято назначать $1/16-1/40$. В соответствии с этими рекомендациями были назначены геометрические параметры исследуемых объектов. При этом необходимым соблюдением угла наклона раскосов решетки, который должен быть в пределах $30-60^\circ$.

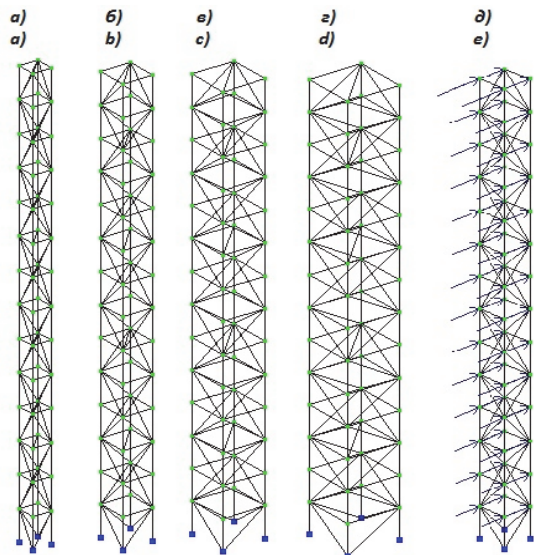


Рис. 1. Расчетные схемы призматических башен в зависимости от ширины основания и схема приложения ветровой нагрузки в ПК «ЛИРА-САПР» (д): а – 1,7 м; б – 2,8 м; в – 4,0 м; г – 5,0 м
[Figure 1. Design schemes of prismatic towers depending on the width of the base and the scheme of application of wind load in the PC “LIRA-SAPR” (e): а – 1.7 m; б – 2.8 m; в – 4.0 m; г – 5.0 m]

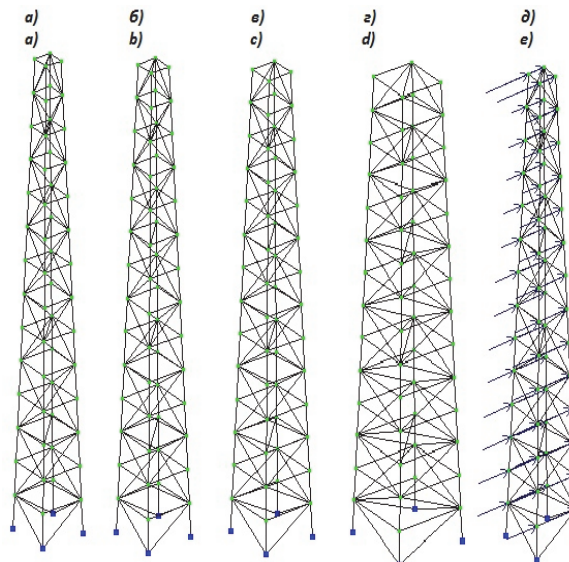


Рис. 2. Расчетные схемы пирамидальных башен в зависимости от ширины основания и схема приложения ветровой нагрузки в ПК «ЛИРА-САПР» (д): а – 4,5 м; б – 4,8 м; в – 5,3 м; г – 7,3 м
[Figure 2. Design schemes of pyramidal towers depending on the width of the base and the scheme of application of wind load in the PC “LIRA-SAPR” (e): а – 4.5 m; б – 4.8 m; в – 5.3 m; г – 7.3 m]

На башню действуют следующие нагрузки: собственный вес элементов конструкции, ветровая нагрузка, технологическая нагрузка (оборудование на отметке +42,000 м массой 100 кг и наветренной площадью 3 м^2 ; вдоль ствола башни: шесть веток фидеров диаметром 39 мм каждая и три провода для питания фонарей ЗОМ (заградительных огней малой интенсивности) диаметром 13 мм каждый).

Сбор нагрузок был выполнен в соответствии с действующими нормами. Для башен ветровая нагрузка собирается отдельно на конструкцию башни и отдельно на оборудование. Данная нагрузка напрямую связана с такими параметрами сооружения, как ширина башни, высота панели, тип и поперечный размер сечений элементов. При изменении данных параметров происходит изменение статической составляющей ветровой нагрузки, что связано с изменением проекции суммарной площади элементов конструкции на плоскость, перпендикулярную направлению действия ветровой нагрузки, изменение коэффициента лобового

сопротивления. Пульсационная составляющая нагрузки также изменяется при изменении параметров конструкции, так как при изменении геометрических характеристик сооружения изменяются и его динамические характеристики [3].

При составлении зависимостей между искомыми параметрами и действующими нагрузками особенности башенной конструкции позволяют заменить дискретную модель (пространственную ферму) на модель с параметрами, непрерывно меняющимися по высоте (стержнем). Таким образом, сбор ветровой нагрузки выполнялся как на консольный стержень, жестко заземленный у основания. При выполнении расчетов вычисляются значения внутренних усилий на всех участках. Переход к дискретной модели осуществляется путем деления полученных значений на число расчетных участков. При выполнении расчетов башни по высоте были разделены на 7 участков, в пределах которых жесткостные характеристики и распределение нагрузок принимались постоянными.

3. Результаты поиска рациональной конструктивной формы башен сотовой связи

По результатам расчетов существующих башенных опор установлено, что выбор габаритных размеров выполнен преимущественно исходя из обеспечения требований первого предельного состояния, второе предельное состояние обеспечено, как правило, с двукратным запасом. При проектировании высотных сооружений основным критерием создания формы должно быть принято одновременное соблюдение требований первого предельного состояния самой конструкцией и отдельными элементами, и соблюдение требований второго предельного состояния для всей башни в целом. Одновременное выполнение требований двух предельных состояний – основной критерий оптимизации формы башен.

Исходя из рекомендуемых диапазонов, были назначены геометрические параметры призматических башен (рис. 1). Для определения влияния ширины башни на величины металлоемкости и мак-

симальной деформации конструкции рассматривались призматические башни с шириной основания 1,7 м ($K = 0,04$), 2,8 м ($K = 0,067$), 4,0 м ($K = 0,095$) и 5,0 м ($K = 0,119$), где K – отношение ширины сооружения к его высоте, $K = b/H$, при этом высота типовой секции постоянна и составляет $h = 3,0$ м. Результат подбора сечения элементов конструкции представлен в табл. 2.

Ширина сооружения влияет непосредственно на величину ветровой нагрузки. Так, величина частоты собственных колебаний конструкции влияет на пульсационную составляющую. Зависимость изменения частот собственных колебаний призматических башенных опор данной высоты от величины K (рис. 3) можно аппроксимировать кривой следующего вида:

$$f_c = 0,095 + 24,91 \cdot K - 57,81 \cdot K^2, \quad (1)$$

где f_c – первая частота собственных колебаний, Гц; K – отношение ширины основания к высоте конструкции.

Таблица 2

Сечения элементов призматических и пирамидальных башен
[Table 2. Sections of the elements of prismatic and pyramidal towers]

Параметры башни в зависимости от очертания сооружения [The parameters of the tower, depending on the shape of the structure]	Элемент конструкции [Construction element]				
	Пояс [Belt]	Распорки [Spacers]	Раскосы [Bracing]	Металлоемкость, т [Intensity of metal, t]	
Призматические башни с высотой секции 3,0 м и шириной основания: Prismatic towers with a section height of 3,0 m and a base:	1,7 м	$\emptyset 54 \times 3,0$ $\emptyset 159 \times 3,8$	$\emptyset 32 \times 3,0$ $\emptyset 40 \times 3,0$	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	2,194
	2,8 м	$\emptyset 51 \times 3,5$ $\emptyset 140 \times 3,2$	$\emptyset 48 \times 3,0$ $\emptyset 60 \times 3,0$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	3,011
	4,0 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 114 \times 3,5$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	$\emptyset 89 \times 3,0$ $\emptyset 102 \times 3,0$	4,137
	5,0 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 108 \times 3,5$	$\emptyset 89 \times 3,0$ $\emptyset 102 \times 3,0$	$\emptyset 95 \times 3,2$ $\emptyset 114 \times 4,0$	5,278
Пирамидальные башни высотой секции 3,0 м и шириной основания: Pyramidal towers with a section height of 3,0 m and a base:	4,5 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 36 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 108 \times 3,0$	2,976
	4,8 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 42 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	$\emptyset 63,5 \times 3,0$ $\emptyset 114 \times 3,0$	3,250
	5,3 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 127 \times 3,0$	3,824
	7,3 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 89 \times 3,0$ $\emptyset 127 \times 3,0$	$\emptyset 95 \times 3,2$ $\emptyset 152 \times 3,0$	6,567
Призматические башни с основанием 2,8 м и высотой секции: Prismatic towers with a base of 2,8 m and a section height:	2,0 м	$\emptyset 38 \times 3,0$ $\emptyset 152 \times 3,0$	$\emptyset 48 \times 3,0$ $\emptyset 60 \times 3,0$	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 73 \times 3,0$	3,499
	3,0 м	$\emptyset 51 \times 3,5$ $\emptyset 140 \times 3,2$	$\emptyset 48 \times 3,0$ $\emptyset 60 \times 3,0$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	3,011
	3,5 м	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 140 \times 3,2$	$\emptyset 48 \times 3,0$ $\emptyset 60 \times 3,0$	$\emptyset 76 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,8$	3,127
Пирамидальные башни с основанием 4,5 м и высотой секции: Pyramidal towers with a base of 4,5 m and a section height:	2,5 м	$\emptyset 38 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,0$	$\emptyset 32 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 45 \times 3,0$ $\emptyset 102 \times 3,0$	3,871
	3,0 м	$\emptyset 51 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,2$	$\emptyset 36 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 108 \times 3,0$	2,976
	3,5 м	$\emptyset 60 \times 3,0$ $\emptyset 89 \times 3,5$	$\emptyset 38 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 70 \times 3,0$ $\emptyset 114 \times 3,0$	2,973
	6,0 м	$\emptyset 102 \times 3,0$ $\emptyset 133 \times 3,2$	$\emptyset 36 \times 3,0$ $\emptyset 76 \times 3,0$	$\emptyset 102 \times 3,0$ $\emptyset 152 \times 3,0$	3,448

Примечание: в числителе указаны значения, соответствующие сечению элементов верхнего участка, в знаменателе – нижнего.
[Note: the numerator indicates the values corresponding to the cross section of the elements of the upper segment, in the denominator – the lower one.]

Для упрощения расчета башни разбиваются на участки по высоте. При этом работа участков отличается. Так, нижний участок является наиболее ответственным. Именно он самый нагруженный, поскольку воспринимает нагрузку от всей конструкции и передает ее на обреш фундамента. В элементах нижнего участка возникают максимальные значения внутренних усилий, что является причиной увеличения размера поперечного сечения элементов. Примечательно, что сечения элементов верхних участков обуславливаются величиной предельной гибкости. Таким образом, происходит изменение величины металлоемкости по высоте (рис. 4).

Зависимость металлоемкости от отношения ширины основания к высоте башни (рис. 5) для призматических башен может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$M = 0,6383 + 6,043 \cdot K + 74,164 \cdot K^2, \quad (2)$$

где M – металлоемкость, т; K – отношение основания к высоте конструкции.

Анализируя результаты, можно сказать, что призматическая башня с отношением $K = 0,067$ (основание – 2,8 м, высота секции – 3,0 м) наиболее рациональна. При таком отношении конструкция имеет минимальную металлоемкость (рис. 5) и значение деформации ниже предельно допустимого значения (рис. 6). Башня с отношением $K = 0,04$ (ширина основания – 1,7 м) хоть и имеет самое минимальное значение металлоемкости, но не удовлетворяет требованиям II предельного состояния, поэтому ее нельзя назвать рациональным решением. При этом во всех рассмотренных башенных сооружениях основная доля металлоемкости при-

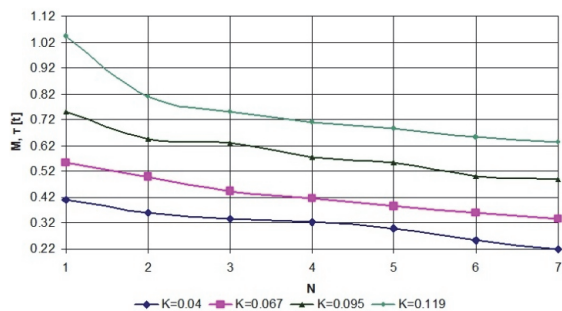


Рис. 4. График изменения металлоемкости на отдельных участках призматических башен по высоте: N – номер участка

[Figure 4. Graph of metal intensity change in selected sections of prismatic towers by height: N – section number]

ходится на раскосы, в то время как на пояса приходится наименьшая доля металлоемкости (рис. 7).

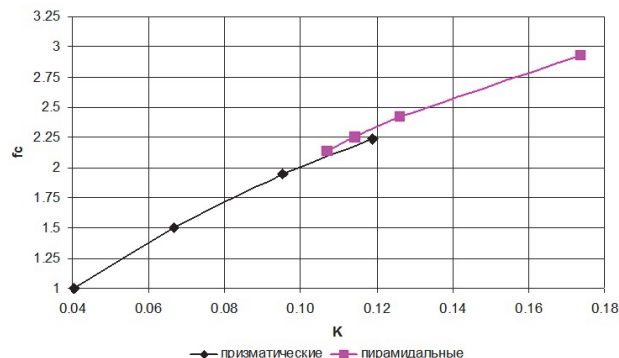


Рис. 3. График изменения частот собственных колебаний башен (f_c) в зависимости от отношения ширины основания к высоте конструкции (K): за $f_c = 1$ принято наименьшее значение частоты собственных колебаний, что соответствует призматической башне с $K = 0,04$ (ширина основания – 1,7 м)

[Figure 3. The graph of changes in the frequencies of natural oscillations of towers (f_c) as a function of the ratio of the base width to the height of the structure (K): $f_c = 1$ is the smallest value of the natural frequency, which corresponds to a prismatic tower with $K = 0,04$ (base width – 1,7 m)]

Геометрические размеры пирамидальных башен (рис. 2) были назначены аналогично призматическим башням, исходя из рекомендуемых диапазонов. Среди сооружений пирамидального очертания рассматривались башни с шириной основания 4,5 м ($K = 0,107$), 4,8 м ($K = 0,114$), 5,3 м ($K = 0,126$) и 7,3 м ($K = 0,174$), где K – отношение ширины сооружения к его высоте, $K = b/H$, при этом высота типовой секции сохранялась постоянной и составила $h = 3,0$ м. Результат подбора сечения элементов конструкции представлен в табл. 2.

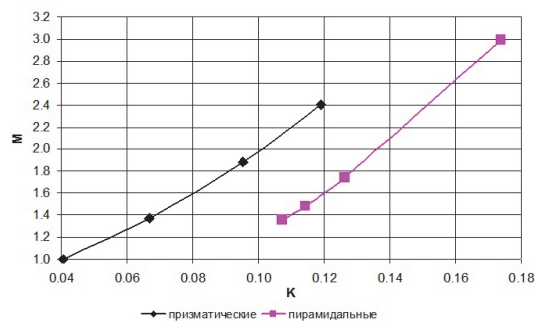


Рис. 5. График зависимости металлоемкости (M) от отношения ширины основания к высоте (K): за $M = 1$ принято наименьшее значение металлоемкости, что соответствует призматической башне с $K = 0,04$ (ширина основания – 1,7 м)

[Figure 5. The graph of metal intensity (M) as a function of the ratio of the base width to the height (K): for $M = 1$ accepted the smallest value of metal which corresponds to the prismatic tower with $K = 0,04$ (base width – 1,7 m)]

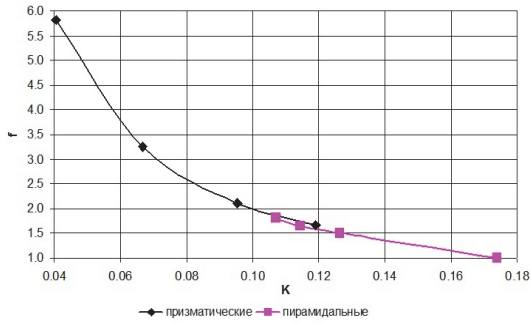


Рис. 6. График зависимости деформации (f) от отношения ширины основания к высоте (K): за $f = 1$ принято наименьшее значение деформации, что соответствует пирамидальной башне с $K = 0,174$ (ширина основания – 7,3 м)
[Figure 6. The plot of the deformation (f) versus the ratio of the base width to the height (K): $f = 1$ the smallest strain value is taken, which corresponds to a pyramidal tower with $K = 0.174$ (base width – 7.3 m)]

Изменение частоты собственных колебаний для пирамидальных башен с различной шириной основания представлено на рис. 3. Данная зависимость для пирамидальных башен может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$f_c = -0,428 + 31,39 \cdot K - 69,49 \cdot K^2, \quad (3)$$

где f_c – первая частота собственных колебаний, Гц; K – отношение ширины основания к высоте конструкции.

Аналогично призматическим башням происходит изменение металлоемкости по высоте сооружения (рис. 8).

Зависимость металлоемкости от отношения ширины основания к высоте башни (рис. 5) может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$M = 0,338 + 0,262 \cdot K + 86,22 \cdot K^2, \quad (4)$$

где M – металлоемкость, т; K – отношение основания к высоте башни.

Все рассматриваемые башни удовлетворяют требованиям первого и второго предельных состояний, однако пирамидальная башня с отношением $K = 0,107$ (основание – 4,5 м, высота секции – 3,0 м) имеет наименьшее значение металлоемкости (рис. 5) и максимальное значение деформации ниже предельно допустимого значения (рис. 6), что и делает ее наиболее рациональным конструктивным решением для пирамидальных башен данной высоты. Основная доля металлоемкости также приходится на раскосы, наименьшая доля приходится на пояса (рис. 9).

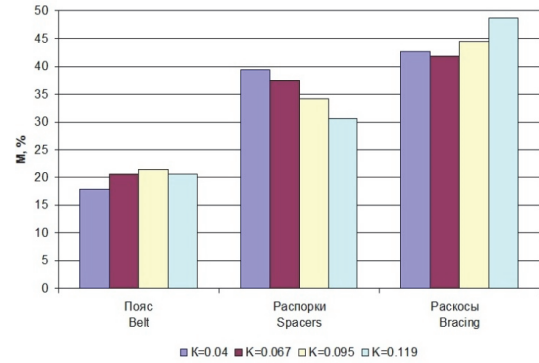


Рис. 7. Гистограмма распределения металлоемкости по элементам призматических башен
[Figure 7. Histogram of the distribution of metal among elements of prismatic towers]

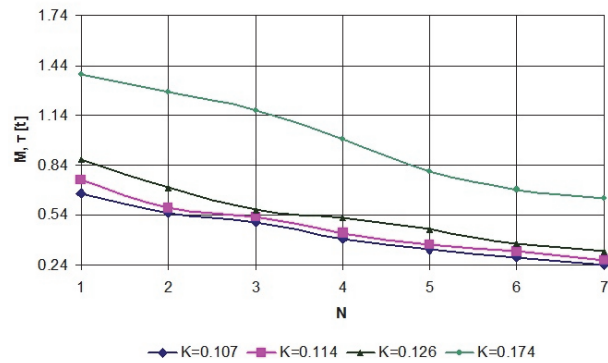


Рис. 8. График изменения металлоемкости на участках пирамидальных башен по высоте: N – номер участка
[Figure 8. Graph of metal intensity change in the areas of pyramidal towers by height: N – section number]

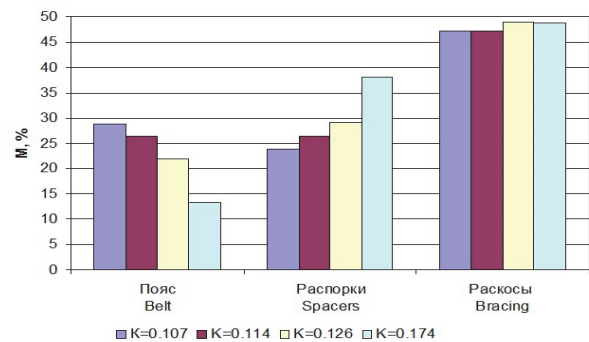


Рис. 9. Гистограмма распределения металлоемкости по элементам пирамидальных башен
[Figure 9. Histogram of the distribution of metal among the elements of pyramidal towers]

Проанализируем, как влияет высота типовой секции конструкции на величину металлоемкости всего сооружения (рис. 10). Для расчета возьмем башенную опору призматической формы высотой $H = 42$ м и с основанием 2,8 м, коэффициент отношения основания к высоте $K = 0,067$. С целью соблюдения величины угла наклона раско-

сов решетки были рассмотрены башни с высотой секции 2,0 м ($d = 0,71$), 3,0 м ($d = 1,07$) и 3,5 м ($d = 1,25$), где d – отношение высоты секции к ширине основания, $d = h/b$. Полученные сечения элементов представлены в табличной форме. Результаты подбора сечений элементов приведены в табл. 2.

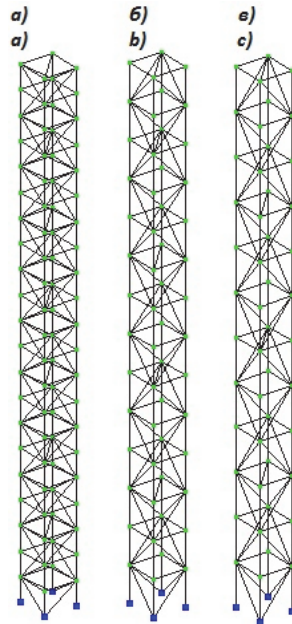


Рис. 10. Расчетные схемы призматических башен с шириной основания 2,8 м и с высотой яруса: а – 2,0 м; б – 3,0 м; в – 3,5 м

[Figure 10. Design schemes prismatic towers with a base width of 2,8 m and with a height of the tier: а – 2.0 m; б – 3.0 m; в – 3.5 m]

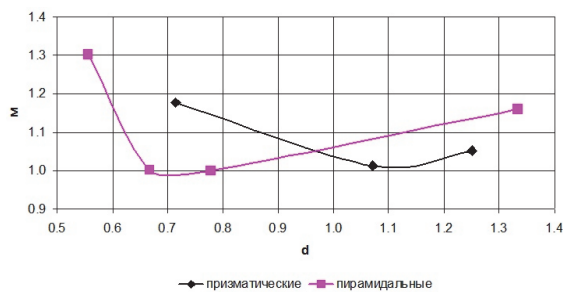


Рис. 11. График зависимости металлоемкости (M) от отношения высоты типовой секции к ширине основания (d): за $M = 1$ принято наименьшее значение металлоемкости, что соответствует пирамидальной башне с $d = 0,78$ (высота секции – 3,5 м)

[Figure 11. The graph of the dependence of metal (M) on the ratio of the height of a typical section to the width of the base (d): for $M = 1$ accepted the smallest value of metal which corresponds to the pyramidal tower with $d = 0,78$ (section height – 3,5 m)]

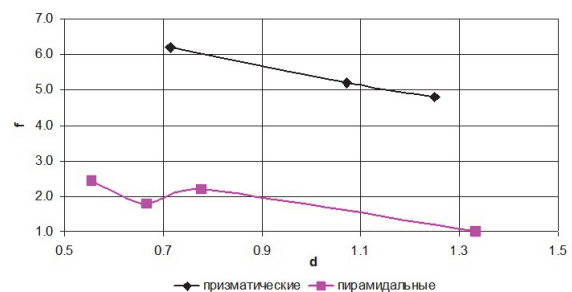


Рис. 12. График зависимости деформации (f) от отношения высоты типовой секции к ширине основания (d): за $f = 1$ принято наименьшее значение деформации, что соответствует пирамидальной башне с $d = 1,333$ (высота секции – 6,0 м)

[Figure 12. The graph of the dependence of the deformation (f) on the ratio of the height of the typical section to the base width (d): for $f = 1$ taken the smallest strain value that corresponds to the pyramidal tower with $d = 1,333$ (section height – 6,0 m)]

Зависимость металлоемкости от отношения ширины основания к высоте типовой секции (рис. 11) может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$M = 2,471 - 2,715 \cdot d + 1,26 \cdot d^2, \quad (5)$$

где M – металлоемкость, т; d – отношение высоты типовой секции к ширине основания.

По результатам видно, что призматическая башня с отношением $d = 1,07$ (основание – 2,8 м, высота секции – 3,0 м) наиболее рациональна, так как удовлетворяет требованиям предельных состояний, а именно, имеет минимальную металлоемкость (рис. 11) и значение деформации ниже предельно допустимого значения (рис. 12). Башня с отношением $d = 1,25$ (высота секции – 3,0) также удовлетворяет требованиям предельных состояний, однако имеет большую металлоемкость в сравнении с башней с отношением $d = 1,07$.

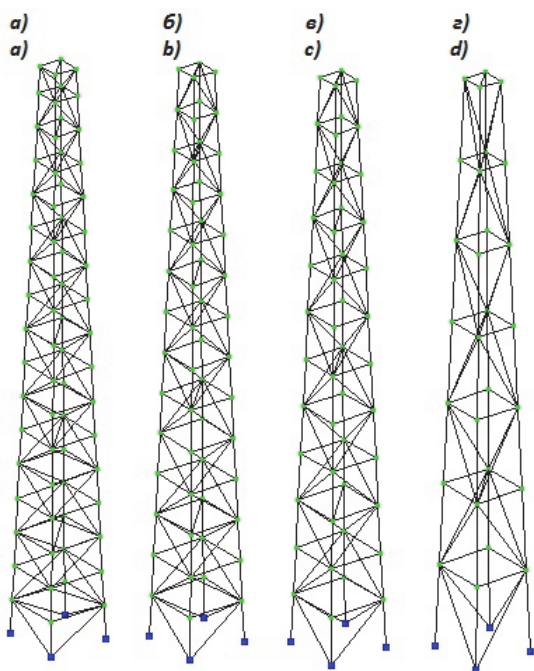


Рис. 13. Расчетные схемы пирамидальных башен с шириной основания 4,5 м и с высотой яруса:

а – 2,5 м; б – 3,0 м; в – 3,5 м; г – 6,0 м

[Figure 13. The design schemes of pyramidal towers with a base width of 4,5 m and with a height of the tier:

a – 2,5 m; b – 3,0 m; c – 3,5 m; d – 6,0 m]

Для дальнейшего анализа работы башен пирамидальной формы рассматривались башни высотой $H = 42$ м и с шириной основания 4,5 м, отношение основания к высоте $K = 0,107$. Изучалась работа башен с высотой секции 2,5 м ($d = 0,56$),

3 м ($d = 0,67$), 3,5 м ($d = 0,78$) и 6 м ($d = 1,33$) (рис. 13), где d – отношение высоты секции к ширине основания, $d = h/b$. Полученные сечения элементов представлены в табличной форме. Результаты подбора сечений элементов башенных опор приведены в табл. 2.

Зависимость металлоемкости от отношения высоты типовой секции к ширине основания (рис. 11) может быть аппроксимирована кривой следующего вида:

$$M = \frac{1}{-0,763 + 3,891 \cdot d - 2,007 \cdot d^2}, \quad (6)$$

где M – металлоемкость, т; d – отношение основания к высоте секции.

На графике металлоемкости (рис. 11) крайняя левая точка $d = 0,56$ обусловлена увеличением количества элементов конструкции, точка $d = 1,33$ обусловлена значением предельной гибкости элементов. По графикам видно, что башня с отношением $d = 0,78$ (основание – 4,5 м, высота секции – 3,5 м) является наиболее рациональной, так как имеет минимальную металлоемкость и максимальное значение деформации ниже предельно допустимого значения (рис. 12).

Выводы

Выполнены классификация и анализ опыта проектирования башенных опор сотовой связи; на основании анализа сделан вывод об отсутствии четкого нормирования эффективных геометрических параметров для данного типа сооружения, что обосновывает выбор предмета исследования данной статьи.

В качестве критериев оптимизации конструктивной формы приняты два основных критерия – критерий одновременного соблюдения требований двух предельных состояний, что является естественным следствием требований нормативной литературы по проектированию стальных строительных конструкций, и минимальная металлоемкость сооружения, что обеспечивает минимальную стоимость в деле.

По результатам определения влияния изменения ширины призматической башенной опоры сотовой связи на металлоемкость при условии соблюдения требований I и II предельных состояний выявлено экономически выгодное решение сооружения – опора с отношением ширины башни к ее высоте $K = 0,067$.

По итогам исследования влияния высоты типовой секции на металлоемкость призматической

опоры с отношением ширины основания башни к ее высоте $K = 0,067$ по критерию максимально допустимого значения деформации установлено, что оптимальное отношение высоты секции к ширине основания составляет $d = 1,07$.

Исследование влияния ширины основания башни пирамидальной формы на металлоемкость конструкции по критерию реализации максимально допустимого значения деформации сооружения показало, что пирамидальная башенная опора с отношением ширины основания к высоте конструкции $K = 0,107$ наиболее рациональна.

Результаты исследования зависимости металлоемкости и значения деформации сооружения как частного случая первого критерия от изменения высоты секции показали, что конструктивные решения башен с отношением высоты секции к ширине основания башни $d = 0,78$ являются наиболее экономически выгодным вариантом.

Список литературы

1. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С., Пуховский А.Б., Ведеников Г.С., Уваров Б.Ю. Металлические конструкции: учебник для студ. высш. учеб. заведений. 10-е изд. / под ред. Ю.И. Кудишина. М.: Академия, 2007. С. 600–624.

2. Аржаков В.Г., Бабкин В.И., Горев В.В., Енджиговский Л.В., Зверев В.В., Казарновский В.С. Металлические конструкции: в 3 т. Т. 3. Специальные конструкции и сооружения: учебник для строит. вузов. 2-е изд. / под ред. В.В. Горева. М.: Высш. шк., 2002. С. 86–117.

3. Павловский В.Ф., Кондра М.П. Стальные башни (проектирование и монтаж) / под ред. Л.И. Шитова. Киев: Будівельник, 1979. 198 с.

4. Солодарь М.Б., Кузнецова М.В., Плишкин Ю.С. Металлические конструкции вытяжных башен / под ред. Ю.А. Павлова. Л.: Стройиздат, Ленингр. отделение, 1975. 186 с.

5. Стрелецкий Н.С., Гениев А.Н., Беленя Е.И., Балдин В.А., Лессиг Е.Н. Металлические конструкции / под ред. Н.С. Стрелецкого. М.: Стройиздат, 1961. С. 709–739.

6. Польнцев О.Е., Романчугов А.А. Принцип пространственной конфигурации башни связи // Молодой ученый. 2012. № 2 (37). С. 40–47.

7. Khokakaki A., Von Buelow P. Form Exploration and GA-Based Optimization of Lattice Towers Comparing with Shukhov Water Tower // Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints: IASS 2014 Brasilia Symposium, September 15–19, Brasilia, Brazil. 2014. Pp. 1–8.

8. Pavan Kumar M., Markankeya Raju P., Tirupathi Naiku G. Effect of wink speed on structural behaviour of

monopole and self-support telecommunication // Asian Journal of Civil Engineering. 2017. Vol. 18. No. 6. Pp. 911–927.

9. Szafran J., Juszczyk K., Kamiński M. Experiment-based reliability analysis of structural joints in a steel lattice tower // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 154. Pp. 278–292. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.006>

10. Szafran J., Kamiński M., Juszczyk K. Steel lattice tower reliability estimation for serviceability limit state // Monograph from Scientific Conference of IASS Polish Chapters / ed. by L. Małyszko, R. Tarczewski. University of Warmia and Mazury in Olsztyn, 2016. Pp. 95–102.

11. Axisa R., Muscat M., Sant T., Farrugia R.N. Structural assessment of a lattice tower for a small, multi-bladed wind turbine // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2017. Vol. 8. No. 4. Pp. 343–358.

12. Mahesh N., Ranga Rao V. Design and estimation of electric steel tower // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 646–652.

13. Abdulaqder M. Tah, Kamiran M. Alsilevanai, Özakaça M. Comparison of Various Bracing System for Self-Supporting Steel Lattice Structure Towers // American Journal of Civil Engineering. 2017. Vol 5. No 2. Pp. 60–68.

14. Sweetly S., Aswathy Prakash. Comparative Study of Three Pole Structure with Steel and FRP using Finite Element Analysis // International Journal of Science and Research. 2016. Vol. 5. No. 7. Pp. 1266–1269.

15. Zhuge Y., Mills J.E., Ma X. Modeling of the steel lattice tower angle legs reinforced for increased capacity // Engineering Structures. 2012. Vol. 43. Pp. 160–168.

16. Jovašević S., Mohammad Reza Shah Mohammadi, Rebelo C., Pavlović M., Veljković M. New Lattice-Tubular Tower for Onshore WEC. Part 1: Structural Optimization // Procedia Engineering. 2017. Vol. 199. Pp. 3236–3241.

17. Couceiro L., Paris J., Martínez S., Colominas I., Navarrina F., Casteleiro M. Structural optimization of lattice steel transmission towers // Engineering Structures. 2016. Vol. 117. Pp. 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.005>

18. Schafhirt S., Zwick D., Muskulus M. Two-stage local optimization of lattice type support structures for offshore wind turbines // Ocean Engineering. 2016. Vol. 117. Pp. 163–173.

19. Amlan Das, Shiva Kumar. Modelling and Analysis of Lattice Towers for Wind Turbines // International Journal of Science and Research. 2015. Vol. 4. No. 4. Pp. 999–1003.

Для цитирования

Голиков А.В., Михальчонок Е.А. Определение рациональной конструктивной формы башен сотовой связи // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 163–173. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173>

Determination of the rational constructive form of cellular communication towers

Alexander V. Golikov, Elena A. Mikhailchonok

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

Article history:

Received: April 18, 2019

Revised: June 02, 2019

Accepted: June 07, 2019

Keywords:

lattice towers; constructive shape; geometric dimensions; stress-strain state; limit state groups; metal intensity; stresses; strains; rational aspect ratios

The need for reliable supports for locating and maintaining the equipment of cellular operators is increasing every year. The classic version of the supports are lattice towers. At present, optimization of the parameters of lattice towers, which is one of the ways to improve the efficiency of their design and construction, is of great importance. The purpose of the work is chosen definition of a rational constructive form of lattice cellular communication towers. In the work, the calculation and analysis of the tower supports of a prismatic and pyramidal form are made with varying basic geometric parameters of the structure and the ratio of parameters between them. To create basic dependencies, numerical modeling methods are used. According to the results of a critical analysis of the literature on the calculation of lattice supports of high-rise buildings, the absence of recommended optimal values of the geometric parameters of structures and the relationship between them was established. The stress-strain state of the design models of lattice towers of a prismatic and pyramidal shape was assessed with variation of the main overall geometric parameters of the structures. To achieve the goal of finding a rational structural form of lattice supports, two rationalization criteria have been tested and applied – the simultaneous fulfillment of the requirements of both limiting states and minimization of the mass of the structure. The results of the study of lattice tower supports are presented in dimensionless parameters, which can be applied by the engineer when assigning the overall dimensions of the structure at the initial design stage.

References

1. Kudishin YuI, Belenya EI, Ignatieva VS, Pukhovskiy AB, Vedenikov GS, Uvarov BYu. *Metallicheskiye konstruksii: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy [Metal constructions: a textbook for students of higher educational institutions]*. 10th ed. Moscow: Akademiya Publ.; 2007. pp. 600–624. (In Russ.)

2. Arzhakov VG, Babkin VI, Gorev VV, Endzhiievskiy LV, Zverev VV, Kazarnovskiy VS. *Metallicheskiye konstruksii: v 3 t. T. 3. Spetsial'nyye konstruksii i sooruzheniya: uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov [Metal constructions: in 3 vols. Vol. 3. Special structures and structures: a textbook for construction universities]*. 2nd ed. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2002. pp. 86–117. (In Russ.)

3. Pavlovskiy VF, Kondra MP. *Stal'nyye bashni (proektirovaniye i montazh) [Steel towers (design and installation)]*. Kiev: Budivel'nik; 1979. (In Russ.)

4. Solodar BB, Kuznetsova MV, Plishkin YuS. *Metallicheskiye konstruksii vytyazhnykh bashen [Metal structures of exhaust towers]*. Leningrad: Stroiizdat Publ., Leningrad Branch; 1975. (In Russ.)

5. Streletskiy NS, Geniyev AN, Belenya EI, Baldin VA, Lessig EN. *Metallicheskiye konstruksii [Metal constructions]*. Moscow: Stroiizdat Publ.; 1961. pp. 709–739. (In Russ.)

6. Polyntsev OE, Romanchugov AA. Printsip prostanstvennoi konfiguratsii bashni svyazi [The principle of the spatial configuration of the communication tower]. *Molodoi uchenyi [Young scientist]*. 2012;2(37): 40–47. (In Russ.)

7. Khokakaki A, Von Buelow P. Form Exploration and GA-Based Optimization of Lattice Towers Comparing with Shukhov Water Tower. *Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints: IASS 2014 Brasilia Symposium, September 15–19, Brasilia, Brazil*. 2014: 1–8.

8. Pavan Kumar M, Markankeya Raju P, Tirupathi Naiku G. Effect of wink speed on structural behaviour of monopole and self-support telecommunication. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017;18(6): 911–927.

9. Szafran J, Juszczyk K, Kamiński M. Experiment-based reliability analysis of structural joints in a steel

Alexander V. Golikov – Associate Professor of the Department of Building Construction, Foundations and Reliability of Structures, Institute of Architecture and Construction, PhD in Technical Sciences; alexandr_golikov@mail.ru

Elena A. Mikhailchonok – master student of the Department of Building Construction, Foundations and Reliability of Structures, Institute of Architecture and Civil Engineering.

lattice tower. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019;154: 278–292. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.11.006>

10. Szafran J, Kamiński M, Juszczak K. Steel lattice tower reliability estimation for serviceability limit state. In: Małyszko L, Tarczewski R. (eds.) *Monograph from Scientific Conference of IASS Polish Chapters*. University of Warmia and Mazury in Olsztyn; 2016. pp. 95–102.

11. Axisa R, Muscat M, Sant T, Farrugia RN. Structural assessment of a lattice tower for a small, multi-bladed wind turbine. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2017;8(4): 343–358.

12. Mahesh N, Ranga Rao V. Design and estimation of electric steel tower. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2017;8(1): 646–652.

13. Abdulaqder M Tah, Kamiran M Alsilevanai, Özakça M. Comparison of Various Bracing System for Self-Supporting Steel Lattice Structure Towers. *American Journal of Civil Engineering*. 2017;5(2): 60–68.

14. Sweety S, Prakash A. Comparative Study of Three Pole Structure with Steel and FRP using Finite Element Analysis. *International Journal of Science and Research*. 2016;5(7): 1266–1269.

15. Zhuge Y, Mills JE, Ma X. Modeling of the steel lattice tower angle legs reinforced for increased capacity. *Engineering Structures*. 2012;43: 160–168.

16. Jovašević S, Reza Shah Mohammadi M, Rebelo C, Pavlović M, Veljković M. New Lattice-Tubular Tower for Onshore WEC. Part 1: Structural Optimization. *Procedia Engineering*. 2017;199: 3236–3241.

17. Couceiro I, Paris J, Martínez S, Colominas I, Navarrina F, Casteleiro M. Structural optimization of lattice steel transmission towers. *Engineering Structures*. 2016;117: 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.005>

18. Schafhirt S, Zwick D, Muskulus M. Two-stage local optimization of lattice type support structures for offshore wind turbines. *Ocean Engineering*. 2016;117: 163–173.

19. Amlan Das, Shiva Kumar. Modelling and Analysis of Lattice Towers for Wind Turbines. *International Journal of Science and Research*. 2015;4(4): 999–1003.

For citation

Golikov AV, Mikhailchonok EA. Determination of the rational constructive form of cellular communication towers. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 163–173. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-163-173>. (In Russ.)

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
EARTH SCIENCE

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-174-183

УДК 552.56+553.31

Научная статья

**Перспективы золотоносности железисто-кремнистой формации Египта
и Курской магнитной аномалии****Х.Э. Шарафелдин, А.А. Верчеба**Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23*История статьи:*

Поступила в редакцию: 16 января 2019

Доработана: 13 марта 2019

Принята к публикации: 25 марта 2019

Ключевые слова:

полосчатые железокремнистые формации; Восточная пустыня Египта; Аравийско-Нубийский щит; Курская магнитная аномалия; золотая минерализация; неопротерозой; вулканогенно-осадочные отложения; золото-кварц-сульфидный тип руды

Железисто-кремнистые формации (ЖКФ) приурочены к докембрийскому фундаменту Аравийско-Нубийского щита в пределах центральной части Восточной пустыни Египта. С полосчатыми железистыми кварцитами пространственно связана золотая минерализация, представляющая одну из самых древних проявлений золотой руды. Породы докембрия объединены в комплекс отложений неопротерозойского пан-африканского мегацикла развития территории. Полосчатые железокремнистые породы залегают в осадочно-вулканогенных породах, которые формировались в троговых зонах субдукции, и представлены метаморфизованными железистыми кварцитами, джеспилитами и сланцами. В породах ЖКФ проявлены тектонические дислокации, трещины сдвига и трещины отрыва, выполненные золото-кварц-сульфидной минерализацией. Состав пород ЖКФ определяется присутствием двух главных минералов: кварца и гематита. Перспективными на выявление золотосодержащей минерализации в породах ЖКФ могут быть железистые кварциты с проявлением продуктов эпигенетической гидротермальной деятельности в результате активизации субмаринного вулканизма толеитового типа.

Введение

Докембрийские полосчатые железисто-кремнистые формации (ЖКФ) – одно из величайших минеральных сокровищ земного шара. Это – главный мировой источник железа. Породы ЖКФ широко распространены в архее и палеопротерозое и содержат стратифицированные залежи железной руды.

Наиболее важные районы распространения пород ЖКФ – озеро Верхнее (США), Рапитан, Лабра-

дор (Канада), Хамерсли (Австралия), Трансвааль (Южная Африка), Кривой Рог (Украина), Воронежский кристаллический массив, Курская магнитная аномалия (КМА) (Россия), Минас-Жерайс (Бразилия). Новые данные свидетельствуют о том, что отложения железисто-кремнистой формации могли образоваться в палеозое. В Китае обнаружено месторождение полосчатых железных руд кембрийского возраста (527 млн лет) [1].

Важное значение имеют и сопутствующие полезные компоненты, в частности золото. На юге Африки, в Зимбабве, расположена группа мелких месторождений золота в относительно небольших зеленокаменных поясах (трогах). Более крупные месторождения, как правило, комплексные и сочетают несколько типов месторождений. В зеленокаменном поясе Амалия в Южной Африке в отло-

Шарафелдин Хани Эльсайед – аспирант кафедры геологии месторождений полезных ископаемых; hanisharfeldin@gmail.com

Верчеба Александр Александрович – декан геологоразведочного факультета, профессор, доктор геолого-минералогических наук.

© Шарафелдин Х.Э., Верчеба А.А., 2019



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

жениях ЖКХ разрабатываются три месторождения: Абельскоп, Гудплейс, Бозменрус, а в Танзании осваивается месторождение Гейта (Западная Африка).

Таким образом, с докембрийскими отложениями железисто-кремнистой формации пространственно связано проявление благороднометалльной минерализации и, в частности, золотого оруденения. Особенности локализации месторождений золота в породах железисто-кремнистой формации исследованы на территории КМА и в Восточной пустыне Египта.

Цель работы – изучить геологические особенности состава и строения пород железисто-кремнистой формации Восточной пустыни Египта и КМА с позиций их потенциальной золотоносности и прогнозирования комплексных золото-железородных месторождений в докембрийских формациях фундамента древних платформ.

Основываясь на геологической обстановке и предполагаемом способе формирования, Г. Гросс выделил три основных типа образований железисто-кремнистой формации [2]:

1) вулканогенно-осадочный субмаринный (тип Алгомы), потенциально золотоносный, обычно архейского возраста;

2) осадочно-терригенный мелководный (тип Сюпириор), как правило, палеопротерозойского возраста;

3) неопротерозойские залежи железистых кварцитов (тип Рапитан), также относятся к ЖКФ, но гораздо менее распространены по сравнению с архейско-нижнепротерозойскими отложениями.

1. Железисто-кремнистые формации Курской магнитной аномалии

Одним из изученных районов распространения пород ЖКФ является Курская магнитная аномалия. КМА – это крупнейший железорудный бассейн в России, который занимает площадь более 160 тыс. км² и приурочен к Воронежскому выступу докембрийских кристаллических пород.

Железисто-кремнистые отложения прослежены в меридиональном направлении вдоль троговых зон, приурочены к кристаллическому фундаменту, глубина залегания которого колеблется в пределах 60–650 м. Общая мощность продуктивной толщи железистых кварцитов достигает 200 м.

Богатые руды связаны с древней корой выветривания железистых кварцитов, являясь про-

дуктом их окисления и природного обогащения. Они состоят в основном из мартита, мелкочешуйчатого гематита, лимонита и сидерита. Богатые руды проявлены в двух формах залегания: горизонтальные плащеобразные залежи на головах пластов железистых кварцитов и крутопадающие залежи, уходящие иногда на глубину до 700 м.

Железные руды докембрийского возраста перекрыты чехлом палеозойских, мезозойских и кайнозойских отложений мощностью до 350 м и более.

Запасы разведанных месторождений превышают 65,2 млрд т; из них более половины сконцентрировано в уникальных по запасам месторождениях: Михайловском в Курской области, Лебединском, Стойленском, Стойло-Лебединском, Коробковском и Приоскольском – в Белгородской области. Запасы каждого превышают 2 млрд т.

На территории бассейна КМА распространены два промышленных типа железных руд: осадочно-метаморфизованные железистые кварциты (джеспилиты) (до 40 % Fe) и богатые железные руды коры выветривания (до 65 % Fe). Железистые кварциты слагают большую часть пород средней свиты курской серии нижнего протерозоя. Среднее содержание Fe в железистых кварцитах 32–36 %, в мартитовых и железно-слюдково-мартитовых рудах коры выветривания 52–66 % с малым содержанием вредных примесей. Например, палеопротерозойские железисто-кремнистые формации Воронежского кристаллического массива (ВКМ) имеют низкое содержание Al, Ti, Cr, Ni и REE. Результаты минералого-геохимических исследований металлоносных кремнистых обломочных пород Коробковского, Лебединского, Стойленского и Александровского месторождений Старооскольского железорудного района Курской магнитной аномалии показали их геохимическую специализацию на U, Y, TR, Zr, P, As, Se, Au, Ag при высокой вариативности содержания перечисленных элементов [3].

Изучение рудоносности кремнистых пород на площади промышленного железорудного района весьма перспективно, учитывая значительные ресурсы содержащихся в них полезных компонентов (U, Au, Y, TR, Zr и т.д.), которые могут быть попутно извлечены при комплексном освоении крупнотоннажных железорудных месторождений.

Золотоносность железисто-кремнистых отложений также проявлена в породах фундамента Воронежского кристаллического массива. Известны небольшие проявления золота в железисто-

кремнистых образованиях обоянского комплекса раннего архея, содержащие до 5,9 г/т Pt и 1,3–7,5 г/т Au [4].

Обломочные породы стойленской свиты курской серии нижнего протерозоя КМА в отдельных участках района сульфидизированы, и только в таких минерализованных преимущественно пиритом породах установлено значимое содержание золота. Базальные кварцевые конгломераты мощностью 1,0–1,3 м содержат золото от 1,0 до 3,0 г/т. Относительно повышенная золотоносность (до 6 г/т) отмечена в конгломератах южного фланга Коробковского месторождения КМА. Золотоносные конгломераты сильно деформированы и метаморфизованы, содержат большое количество циркона и ильменита (до 15 %), а среди сульфидов заметно возрастает роль пирротина

Наиболее полно изучены многочисленные проявления золота, приуроченные к железистым кварцитам «курского типа». Курский тип месторождений объединяет кварц-конгломератовые прослои с повышенным содержанием золота, металлов платиновой группы, отчасти урана, связанные с раннепротерозойскими рифтогенными структурами. Содержание драгоценных металлов в различных металлогенических зонах колеблется в широких пределах: от Pt – 10–100 мг/т, Pd – 20–200 мг/т, МПГ до 0,5 г/т, Au – 0,1–475 г/т, U – 0,05–0,15 %. Повышенное содержание золота также приурочено к межформационным сланцам палеопротерозойского комплекса [3].

2. Железисто-кремнистые формации Восточной пустыни Египта

Другой район распространения отложений ЖКФ, который исследуется в последнее время, – это территория Восточной пустыни Египта, занимающая северо-восточную окраину Аравийско-Нубийского щита (рис. 1). Полосчатые железистые кварциты и джеспилиты распространены в неопротерозойских осадочно-вулканогенных породах докембрийского фундамента (760–650 млн лет) и вытянуты в троговых зонах вдоль западного побережья Красного моря. Они отнесены к зеленосланцевой фации метаморфизма. В геологической литературе железисто-кремнистые полосчатые породы соответствуют Banded Iron Formation (BIF).

Ореол отложений ЖКФ занимает площадь около 30 тыс. км². Общие запасы железной руды ЖКФ

в Восточной пустыне составляют 53 млрд т [5], которые в настоящее время не используются из-за высокого содержания в них SiO₂ [6].

Минеральный состав полосчатых железистых кварцитов из разных районов Восточной пустыни Египта определяется присутствием двух главных минералов: кварца и гематита; кроме того, постоянно в небольших количествах отмечены магнетит и апатит.

Полосчатые железные руды относятся к оксидной (магнетит + гематит), силикатной (кварц + хлорит, кальцит, эпидот, плагиоклаз) и карбонатной (сидерит, кальцит) геохимическим фациям.

3. Геолого-геохимические особенности железисто-кремнистых пород КМА и Восточной пустыни Египта

Наиболее интересная геохимическая особенность объектов ЖКФ Восточной пустыни Египта – высокие отношения Fe/Si и Fe³⁺/Fe²⁺ сравнительно с другими железисто-кремнистыми формациями мира. ЖКФ Египта имеют более высокие значения Al и низкие Cr, Ni в отличие от железистых кварцитов других регионов (табл. 1). Малое количество первичных сульфидов и сидерита говорит об удалении среды осадконакопления от наиболее глубоких частей бассейнов [7]. Оксидная и силикатная геохимические фации ЖКФ наиболее распространены, а в Восточной пустыне Египта карбонатная фация присутствует на некоторых месторождениях – Вади Кареим, Вади Даббах и Хадраба.

Кремнистые, карбонатно-кремнистые и рудно-карбонатно-кремнистые включения прослежены в гематитовых слойках и биминеральных гематит-кварцевых прослойках. Подобные образования могут иметь отчасти коллоидное происхождение, указывать на характер и способ минералообразования в диагенезе.

На месторождениях Египта полосчатые железные руды различаются по содержанию в них оксидов железа. Содержание Fe₂O₃ в отложениях ЖКФ всегда более 50 %. Содержание SiO₂ обычно 37–44 %, Al₂O₃ – до 1,5–2 % [9]. Содержание таких компонентов, как TiO₂, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, CO₂ не превышает нескольких долей процента. Содержание серы и фосфора – несколько тысячных, иногда сотых долей процента (табл. 2). Отмечается довольно высокое содержание железа в яшмовидном кварце, обусловленное присутствием тонко рассеянного дисперсного гематита

и единичных включений мартитизированного магнетита. Повышенные количества кальцита в кварцевых слойках египетских месторождений ЖКФ связаны с тончайшими прожилками эпигенетического карбоната, рассекающего породу.

Относительно высокое отношение $Fe/Si = 1,8-6,2$ (рис. 2) [2] делает их потенциально привлекательными для добычи железной руды и позволяет их разделить на измененные ($Fe/Si > 3,0$) и

неизмененные ($Fe/Si < 3$) руды. Отношение Fe/Si значительно выше для египетских ЖКФ, затронутых изменением (гидротермально-метасоматическим) по сравнению с неизмененными отложениями.

Неизмененные отложения имеют более низкие значения $Fe_{общ}$ и FeO/Fe_2O_3 и обычно более высокое содержание Al_2O_3 по сравнению с измененными железокремнистыми породами (табл. 2).

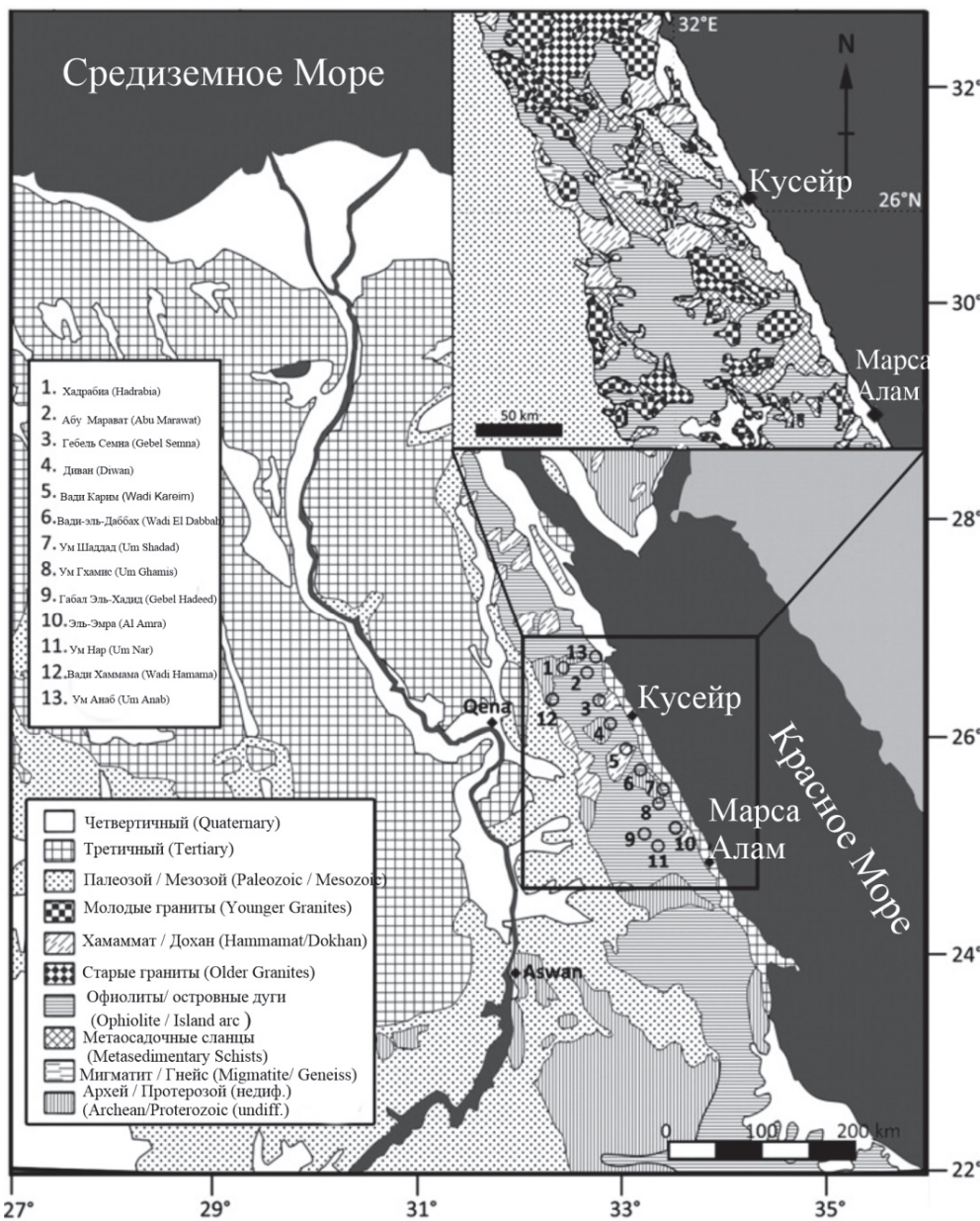


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Египта [8]: вставка показывает расположение месторождений ЖКФ (в кружках)
[Figure 1. Schematic geological map of Egypt [8]: the insert shows the location of the BIF deposits (in circles)]

Геолого-геохимические особенности железисто-кремнистых пород КМА и Восточной пустыни Египта
[Table 1. Geological and geochemical features of ferruginous-siliceous rocks of
Kursk Magnetic Anomaly (KMA) and the Eastern Desert of Egypt]

Параметры ЖКФ [Parameters BIF]	ЖКФ Курской магнитной аномалии [BIF of Kursk Magnetic Anomaly]	ЖКФ Восточной пустыни Египта [BIF of the Eastern Desert of Egypt]
Возраст (млрд лет) [Age (billion years)]	AR (>2,7)	V (0,75–0,65)
Тектоническая позиция [Tectonic position]	Зеленокаменный пояс [Greenstone belt]	Активизированная окраина кратона [Activated craton edge]
Структурная позиция [Structural position]	Троговые зоны фундамента Русской платформы [Trough zone of the basement of the Russian platform]	Троговые зоны в фундаменте Аравийско-Нубийского щита [Trough zone of the basement of the Arabian-Nubian shield]
Вид деформации горных пород и текстуры [Kind of rock deformation and texture]	Складчатость блоковая, тонкая полосчатость [Folding block, thin banding]	Складчатость, грубая плейчатость [Folding, rough flatness]
Вмещающие породы, мощность рудовмещающих отложений [Host rocks, thickness of ore-bearing deposits]	Толейты и известковисто-щелочные вулканы, туфы, граувакки, глинистые сланцы Более 200 м [Tholeiites and calcareous-alkaline volcanics, tuffs, greywackes, shales More than 200 m]	Толейты и известковисто-щелочные вулканы, туфы, граувакки 5–30 м [Tholeiites and calcareous-alkaline volcanics, tuffs, greywackes 5–30 m]
Вулканизм [Volcanism]	Базальтоидный субмаринный [Basalt submarine]	Толейтовый субмаринный [Tholeiitic submarine]
Геохимические особенности пород. Содержание Fe, Fe ³⁺ , Si, Fe/Si, сульфиды металлов, REE [Geochemical features of rocks. Fe, Fe ³⁺ , Si, Fe/Si, metal sulphides, REE content]	Повышенное содержание Cr, Mn, Ni, Cu, As и Au [High grades of Cr, Mn, Ni, Cu, As and Au]	Fe ₂ O ₃ /FeO = 5,5–8. Fe/Si = 1,4–2,75. Пониженные Cr, Co, Ni. [Lower Cr, Co, Ni.] Sm, + Nd, + Eu
Геохимические фации пород [Geochemical facies of rocks]	Оксидная, силикатная, карбонатная [Oxide, silicate, carbonate]	Оксидная, силикатная, карбонатная [Oxide, silicate, carbonate]
Минеральный тип руд [Mineral type of ores]	Магнетит-гематитовый [Magnetite-hematite]	Кварц-магнетит-гематитовый [Quartz-magnetite-hematite]
Рудные минералы [Ore minerals]	Магнетит > гематит [Magnetite > hematite]	Магнетит = гематит [Magnetite = hematite]

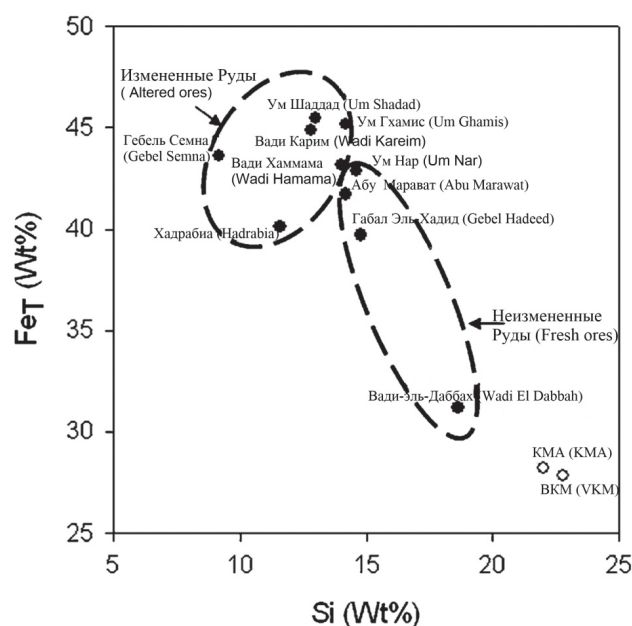


Рис. 2. Геохимическая диаграмма отношения Si/Fe в измененных и неизмененных породах ЖКФ Египта [2]
[Figure 2. Geochemical diagram of the Si/Fe ratio in the fresh and altered rocks of the BIF of Egypt [2]

Химический состав пород железокремнистой формации Египта и России (КМА)
 [Table 2. Chemical composition of rocks of the ferruginous-siliceous formations of Egypt and Russia (KMA)]

% / ppm	Умм Шадад [Um Shadad]	Вади-эль-Дабба [Wadi El Dabbah]	Вади Карим [Wadi Kareim]	КМА [Михайловское месторождение] КМА [Mikhail Field]
	Takla et al., 1999 [10]	Khalil, 2012 [7]	Essawy et al., 1997 [11]	Савко, 2015 [12] [Savko, 2015 [12]]
SiO ₂	27,81	39,96	27,42	52,14
TiO ₂	0,08	0,31	0,09	0,02–2015
Al ₂ O ₃	2,08	6,21	1,18	0,27
Fe ₂ O ₃	53,20	38,60	58,91	48,57
FeO	10,66	5,42	4,73	–
MnO	0,07	0,06	0,05	0,02
MgO	0,83	1,89	0,74	0,15
CaO	3,15	2,79	2,78	0,25
Na ₂ O	0,34	1,18	0,07	0,08
K ₂ O	0,20	1,05	0,02	0,14
P ₂ O ₅	0,06	1,19	0,39	0,08
Zr	43	77	20	1,5
Y	45	36	18	1,04
Sr	70	77	68	10,2
Zn	701	15	26	4,9
Cu	180	39	86	10,6
Ni	152	5	39	–
Co	41	72	8	6

В железных рудах, за исключением наиболее северного месторождения Хадрабия (Hadrabia), преобладающий оксид – магнетит, считающийся первичным, даже если он сильно мартитизирован. На месторождении Хадрабия определены равные количества магнетита и гематита. Сланцеватость отмечается от макро- до мезо- и микроуровней (рис. 3). В железной руде отмечена микробрекчия в рудных гематитовых прослоях, связанная, возможно, с проявлением субмаринных землетрясений при активизации вулканической деятельности (рис. 4). Обычно магнетитовые слои чередуются с гематитовыми и силикатными, и лишь в рудах Хадрабия отмечены седиментогенные оолитовые и пизолитовые текстуры.

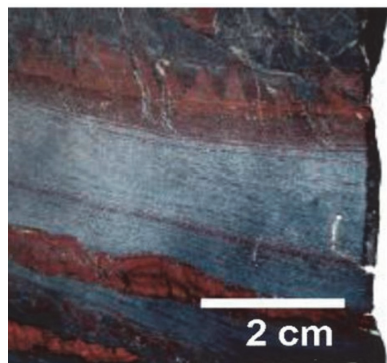


Рис. 3. Микро- и мезополосчатость железисто-кремнистых отложений Египта
 [Figure 3. Macro- and mesoscale of ferruginous-siliceous deposits of Egypt]



Рис. 4. Гематитовая микробрекчия в железной руде
 [Figure 4. Hematite microbreccias in iron ore]

Источниками железа и кремния в ЖКФ обычно являются: химическое выветривание на континентах [13]; вулканическая субмаринная активность или гидротермальная деятельность на дне океана и в осадочных бассейнах [14]; гидротермальное выщелачивание ранее существовавших осадков [15].

Субмаринная вулканическая активность была проявлена в виде образования щелочно-известковых лав и толеитовых базальтов и сопровождалась гидротермальной деятельностью, связанной с островодужным вулканизмом. Эти процессы являются наиболее вероятными источниками железа и кремнезема для ЖКФ на территории Египта.

Так, все египетские месторождения ЖКФ (за исключением Эль-Дабба) по условиям образо-

вания и отношению $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ соответствуют газогидротермальным месторождениям (рис. 5).

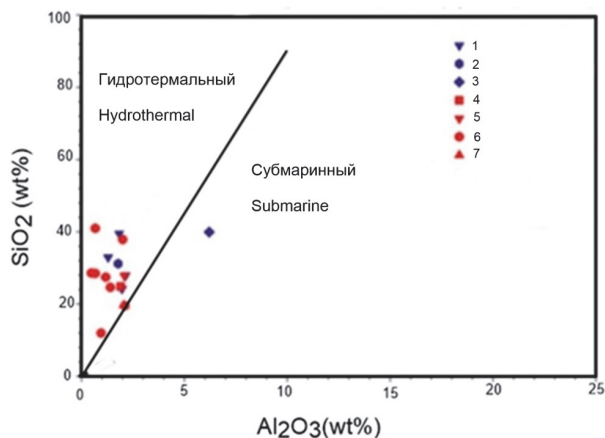


Рис. 5. Геохимическая диаграмма отношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ в ЖКФ месторождений:

1 – Ум Гхамис [10]; 2 – Ум Нар [16]; 3 – Вади-эль-Даббах [9]; 4 – Хадрабия; 5 – Ум Шаддад [10]; 6 – Вади Карим; 7 – Гебель Семна [7]

[Figure 5. Geochemical diagram of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio in BIF deposits:

1 – Um Ghamis [10]; 2 – Um Nar [16]; 3 – Wadi al-Dabbah [9]; 4 – Hadarbia; 5 – Um Shaddad [10]; 6 – Wadi Karim; 7 – Gebel Semna [7]

С полосчатыми железистыми кварцитами Египта пространственно связана золотая минерализация, представляющая одну из самых древних проявлений золотой руды.

Содержание золота в отложениях ЖКФ варьируется от 0,8 до 2,05 г/т (со средним значением 1,5 г/т). Золото показывает значительную положительную корреляцию с Cu, Ni, Co, Pb, Zn и V. Главными компонентами минерализованных золотосодержащих зон в полосчатых железистых кварцитах являются пирит, халькопирит, сидерит, хлорит, карбонаты и кварц.

Содержание золота от 0,3 до 0,6 г/т установлено в железных рудах месторождений Ум Нар и Габал Эль-Хадид. Исследования распределения золота в районе Ум Нар показали, что золотом обогащены гематитовые полосы относительно более богатых магнетитом прослоев.

Золотая минерализация, связанная с оксидной фацией пород, была установлена также в районах Вади Карим, Габал Эль-Хадид и Увейнат [6]. Высокой золотоносностью отличаются железисто-кремнистые породы районов Вади Карим, Вади-эль-Даббах, Умм-Гхадис, Габал-Эль-Хадид и Ум Нар.

Первоначальный золотосодержащий минерал является магнетитом, и его мартитизация обусло-

вила вынос золота и его локальную концентрацию в гематите (мартите). Увеличение содержания золота приурочено к менее деформированным частям железокремнистых пород в связи с перераспределением золота из областей с высокой степенью деформации пород до участков с меньшей деформацией в условиях пластической деформации железисто-кремнистых отложений. Высокое содержание золота выявлено в местах, где проявлены сдвиговые трещины и трещины отрыва, которые могут являться каналными путями для золотосодержащих флюидов. Золото установлено здесь в кварц-карбонатных прожилках в породах ЖКФ.

Заключение

Месторождения золота железисто-кремнистых пород достаточно распространены и занимают определенную геологическую позицию. Это выражается в следующем:

- промышленное оруденение в железисто-кремнистых формациях в зеленокаменных поясах приурочено к линейным трогам, ориентированным вдоль осевой линии зеленокаменных поясов;
- железорудные горизонты, как правило, подстилаются толщей кальциево-щелочных метабазальтов или их туфов вулканической островной дуги;
- золотосодержащие залежи в породах ЖКФ проявлены в районах распространения месторождений вулканогенных массивных сульфидных руд;
- золотая минерализация тяготеет к гематитовым прослоям в сланцах, пластам сульфидной или карбонатной фаций, кремнистым обломочным породам, имеет стратифицированный характер, представлена вкрапленным и прожилково-вкрапленным типами руд;
- ведущее значение на оруденение оказывает структурный контроль, который выражается в формировании зон повышенной проницаемости в железисто-кремнистых породах в местах проявления различных тектонических дислокаций, трещин сдвига и трещин отрыва, выполненных золото-кварц-сульфидной минерализацией;
- оруденение египетских месторождений ЖКФ представлено измененными ($\text{Fe}/\text{Si} > 3,0$) и неизмененными ($\text{Fe}/\text{Si} < 3$) рудами (в зависимости от признаков гидротермальной деятельности), а геохимические особенности золотосодержащих пород ЖКФ указывают на высокие отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, Fe/Si и $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, что свойственно измененным

(гидротермальным) месторождениям железисто-кремнистой формации мира;

– минеральный состав золотоносных ЖКФ определяется присутствием двух главных минералов: кварца и гематита, кроме того, постоянно в небольших количествах присутствуют магнетит и апатит;

– в породах египетских ЖКФ отмечено повышенное содержание золота (до 2,05 г/т) в гематитовых прослоях, содержащих Cu, Ni, Co, Pb, Zn и сульфидную минерализацию;

– в подстилающих зеленокаменных породах промышленные концентрации золота тяготеют к пересечению разломов и зон расланцевания пород;

– оруденение не распространяется в перекрывающие железисто-кремнистые породы и осадочные толщи;

– перспективными для выявления золотосодержащей минерализации в породах ЖКФ на территории Египта могут быть железокремнистые отложения с проявлением продуктов эпигенетической гидротермальной деятельности в результате активизации субмаринного вулканизма толеитового типа.

Список литературы

1. Li Z.Q., Zhang L.C., Xue C.J., Zheng M.T., Zhu M.T., Robbins L.J., Slack J.F., Planavsky N.J., Konhauser K.O. Earth's youngest banded iron formation implies ferruginous conditions in the Early Cambrian ocean // *Scientific reports*. 2018. Vol. 8. Issue 1. 9970. doi: 10.1038/s41598-018-28187-2
2. Gross G.A., Mcleod C.R. A preliminary assessment of the chemical composition of iron formations in Canada // *The Canadian Mineralogist*. 1997. Vol. 18. Pp. 223–229.
3. Кушнеренко В.К. Докембрийские металлоносные конгломераты КМА. Воронежский кристаллический массив // *Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов: информационный сборник*. Вып. 157. М., 2011. С. 117–121.
4. Савко А.Д., Шевырëв Л.Т. Железисто-кремнистые формации континентов – новые историко-минералогические данные о распределении, возрасте, генезисе // *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2017. № 3. С. 5–17.
5. Dardir A.A. States and futures development of iron and steel industry in Egypt: internal report / *Geological Survey and Mineral Authority*. Egypt, 1990. P. 22.
6. Sims P.K., James H.L. Banded iron ore formation of late Proterozoic age in the CED, Egypt: geological

and tectonic setting // *Economic Geology*. 1984. Vol. 79. Pp. 1777–1784.

7. Khalil K.I., El-Shazly A.K. Petrological and geochemical characteristics of Egyptian banded iron formations: review and new data from Wadi Kareim // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2012. Vol. 2. Pp. 105–126.

8. El Gaby S., List F.K., Tehrani R. The basement complex of the Eastern Desert and Sinai // *The Geology of Egypt / ed. by S. Rushdi*. Rotterdam: Balkema, 1990. Pp. 175–184.

9. Оникиенко Л.Д., Малых В.М., Ибрагим Салем. Сравнительная характеристика яшмовидных железистых кварцитов из месторождений ЮМА, Кривого Рога и Восточной пустыни Египта // *Известия вузов. Геология и разведка*. 1988. № 6. С. 37–44.

10. Takla M.A., Hamimi Z., Hassanein S.M., Kaoud N.N. Characterization and genesis of the BIF associating arc metavolcanics, Umm Ghamis area, Central Eastern Desert, Egypt // *Egypt. Mineral*. 1999. Vol. 11. Pp. 157–185.

11. Essawy M.A., Zalata A.A., Makroum F. Hadrabia Banded Iron Formation, Eastern Desert, Egypt // *Egypt. Min*. 1980. Vol. 9. Pp. 147–168.

12. Савко К.А., Базиков Н.С., Артеменко Г.В. Геохимическая эволюция железисто-кремнистых формаций Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии: источники вещества и геохронологические ограничения // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2015. Т. 23. № 5. С. 3–21.

13. Derry L.A., Jacobsen S.B. The chemical evolution of Precambrian seawater: Evidence from REEs in banded iron formations // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999. Vol. 54. Pp. 2965–2977.

14. Krapez B., Barley M.E., Pickard A.L. Hydrothermal and resedimented origin of the precursor sediments to banded iron formation: sedimentological evidence from the Early Palaeoproterozoic Brockmann Supersquence of Western Australia // *Sedimentology*. 2003. Vol. 50. Pp. 979–1011.

15. Holland H.D. The oceans, a possible source of iron-formations // *Economic Geology*. 1973. Vol. 68. Pp. 1169–1172.

16. El Aref M.M., El Doudgdoug A., Abdel Wahed M., El Manawi A.W. Diagenetic and metamorphic history of Umm Nar BIF, Eastern Desert, Egypt // *Mineral. Deposita*. 1993. Vol. 28. Pp. 264–278.

Для цитирования

Шарафелдин Х.Э., Верчеба А.А. Перспективы золотоносности железисто-кремнистой формации Египта и Курской магнитной аномалии // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 2. С. 174–183. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-174-183>

Perspective of gold-bearing deposits in the ferruginous-siliceous formations of Egypt and Kursk Magnetic Anomaly

Hani E. Sharafeldin, Alexander A. Vercheba

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting,
23 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117997, Russian Federation

Article history:

Received: January 16, 2019

Revised: March 13, 2019

Accepted: March 25, 2019

Keywords:

banded ferruginous-siliceous formation; Eastern Desert of Egypt; Arabian-Nubian Shield; Kursk Magnetic Anomaly; gold mineralization; Neoproterozoic; volcano-genic-sedimentary rocks; gold-quartz-sulphide type of ore

Banded ferruginous-siliceous formations (FSF) are confined to the Precambrian basement of the Arabian-Nubian Shield within the central part of the Eastern Desert of Egypt. Gold mineralization is spatially associated with banded ferruginous quartzite, representing one of the most ancient manifestations of gold ore. The Precambrian rocks are combined into deposits complex of the Neoproterozoic Pan-African megacycle of the territory development. Banded iron-silicate rocks occur in sedimentary-volcanogenic rocks that were formed in the subduction trough zones, and are represented by metamorphosed ferruginous quartzites, jaspilites and schists. FSF show tectonic dislocations, shear cracks, and fracture cracks made by gold-quartz-sulphide mineralization. Promising for the identification of gold-bearing mineralization in the rocks of the FSF can be iron-silicate deposits with the occurrence of epigenetic hydrothermal activity as a result of activation of the submarine volcanism of the tholeiitic type.

References

- Li ZQ, Zhang LC, Xue CJ, Zheng MT, Zhu MT, Robbins LJ, Slack JF, Planavsky NJ, Konhauser KO. Earth's youngest banded iron formation implies ferruginous conditions in the Early Cambrian Ocean. *Scientific reports*. 2018;8(1): 9970. Available from: doi: 10.1038/s41598-018-28187-2.
- Gross GA, Mcleod CR. A preliminary assessment of the chemical composition of iron formations in Canada. *The Canadian Mineralogist*. 1997;(18): 223–229.
- Kushnerenko VK. Dokembriiskie metallonosnye konglomeraty KMA. Voronezhskii kristallicheskii massiv [Precambrian metal-bearing conglomerates KMA. Voronezh crystalline massif]. *Materials on the geology of deposits of uranium and rare earth metals: information collection*. 2011;(157): 117–121. (In Russ.)
- Savko AD, Shevryov LT. Zhelezisto-kremnistye formatsii kontinentov – novye istoriko-mineralogicheskie dannye o raspredelenii, vozraste, genezise [Ferruginous-siliceous formations of continents – new historical and mineralogical data on distribution, age, genesis]. *Bulletin of VSU. Series: Geology*. 2017;(3): 5–17. (In Russ.)
- Dardir AA. *States and futures development of iron and steel industry in Egypt*. Internal report of Geological Survey and Mineral Authority. Egypt; 1990. p. 22.
- Sims PK, James HL. Banded iron ore formation of late Proterozoic age in the CED, Egypt: geological and tectonic setting. *Econ. Geol.* 1984;(79): 1777–1784.
- Khalil KI, El-Shazly AK. Petrological and geochemical characteristics of Egyptian banded iron formations: review and new data from Wadi Kareim. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2012;(2): 105–126.
- El Gaby S, List FK, Tehrani R. The basement complex of the Eastern Desert and Sinai. In: Rushdi S. (ed.) *The Geology of Egypt*. Rotterdam: Balkema; 1990. pp. 175–184
- Onikienko LD, Malykh VM, Salem I. Sravnitel'naya kharakteristika yashmovidnykh zhelezistykh kvartsitov iz mestorozhdenii YuMA, Krivogo Roga i Vostochnoi pustyni Egipta [Comparative characteristics of Jasper-shaped ferruginous quartzites from the deposits of YUMA, Krivoy Rog and the Eastern Desert of Egypt]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka [Proceedings of Higher School. Geology and Exploration]*. 1988;(6): 37–44. (In Russ.)
- Takla MA, Hamimi Z, Hassanein SM, Kaoud NN. Characterization and genesis of the BIF associating arc metavolcanics, Umm Ghamis area, Central Eastern Desert, Egypt. *Egypt. Mineral.* 1999;(11): 157–185.
- Essawy MA, Zalata AA, Makroum F. Hadrabia Banded Iron Formation, Eastern Desert, Egypt. *Egypt. Mineral.* 1980;(9): 147–168.
- Savko KA, Bazikov NS, Artemenko GV. Geokhimicheskaya evolyutsiya zhelezisto-kremnistykh formatsii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva v rannem

Hani Elsayed Sharafeldin – postgraduate student of the Department of Geology of Mineral Deposits; hanisharfeldin@gmail.com
Alexander A. Vercheba – Dean of the Geological Prospecting Faculty, Professor, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences.

dokembrii: istochniki veshchestva i geokhronologicheskie ogranicheniya [Geochemical evolution of ferruginous-siliceous formations of the Voronezh crystalline massif in early Precambrian: sources of matter and geochronological limitations]. *Stratigraphy Geological Correlation*. 2015;23(5): 3–21.

13. Derry LA, Jacobsen SB. The chemical evolution of Precambrian seawater: Evidence from REEs in banded iron formations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999;(54): 2965–2977.

14. Krapez B, Barley ME, Pickard AL. Hydrothermal and resedimented origin of the precursor sediments to banded iron formation: sedimentological evidence from the Early Palaeoproterozoic Brockmann Supersequence of Western Australia. *Sedimentology*. 2003;(50): 979–1011.

15. Holland HD. The oceans, a possible source of iron-formations. *Economic Geology*. 1973;(68): 1169–1172.

16. El Aref MM, El Doudgdoug A, Abdel Wahed M, El Manawi AW. Diagenetic and metamorphic history of Umm Nar BIF, Eastern Desert, Egypt. *Mineral. Deposita*. 1993;(28): 264–278.

For citation

Sharafeldin HE, Vercheba AA. Perspective of gold-bearing deposits in the ferruginous-siliceous formations of Egypt and Kursk Magnetic Anomaly. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 174–183. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-174-183>. (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-184-192
УДК 622.01

Научная статья

Сравнительная характеристика физико-механических свойств андезито-базальтов вулканов Зимины и Камень

В.В. Беленикин, А.С. Пулькова

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

История статьи:

Поступила в редакцию: 24 февраля 2019

Доработана: 20 апреля 2019

Принята к публикации: 15 мая 2019

Ключевые слова:

физико-механические свойства горных пород; скальные грунты; эффузивы вулканов

Физико-механические свойства горных пород определяют поведение горных пород под воздействием внешних усилий (нагрузки) и проявляются в сопротивлении разрушению и деформации. Свойство горных пород сопротивляться разрушению и образованию больших остаточных деформаций под воздействием нагрузки или, точнее, воспринимать, не разрушаясь в определенных пределах и условиях, те или иные нагрузки называется прочностью, а их свойство изменять под нагрузкой форму сложения и объем – деформацией. Эти свойства выражают и оценивают прочностными и деформационными показателями. В статье проведено сравнение физико-механических свойств и строения эффузивов вулканов Зимины и Камень, которые находятся на полуострове Камчатка. Физико-механические свойства эффузивных пород этих вулканов достаточно хорошо изучены, что позволяет составить их детальную характеристику, а также сравнить породы между собой, выделив сходства и различия. Осуществив анализ полученных данных, появляется возможность использовать эту информацию при схожих исследованиях, отождествляя результаты либо при наличии различий объясняя их. Проведенные исследования позволяют более точно объяснить влияние структурных особенностей на изменения физико-механических свойств пород вулканов Камень и Зимины.

Введение

В грунтоведении существует утверждение, согласно которому физико-механические свойства скальных грунтов зависят от генезиса, минерального состава и структурно-текстурных особенностей. Целями данной работы являются проведение опытов по определению физико-механических свойств и их последующее сравнение, а также изучение петрографических особенностей эффузивных пород двух вулканов – Зимины и Камень. Данные вулканы относят к группе Ключевских вулканов.

Для выполнения поставленных целей необходимо изучить:

- имеющиеся литературные данные, современное представление о физико-механических свойствах эффузивных пород, влияние структурных особенностей на изменения физико-механических свойств эффузивных пород;
- структурные особенности эффузивных пород вулканов Камень и Зимины;
- физико-механические свойства эффузивных пород вулканов Камень и Зимины;
- влияние структурных особенностей на изменения физико-механических свойств эффузивных пород вулканов Камень и Зимины;
- сходства и различия эффузивных пород, основываясь на анализе полученных на предыдущих этапах данных.

Беленикин Владимир Васильевич – магистрант Инженерной академии; didifmfc@gmail.com

Пулькова Алина Сергеевна – магистрант Инженерной академии.

© Беленикин В.В., Пулькова А.С., 2019

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

1. Физико-географический очерк района

Вулкан Камень расположен в самом центре Ключевской группы вулканов. Это типичный стратовулкан с конусом правильной формы, потухший, относится к одним из самых древних. Сложен переслаивающимися лавами андезито-базальтового

состава с вкраплениями пироксена и плагиоклаза, реже – роговообманковым андезитом и пирокластикой того же состава. Основанием вулкана служат древние мегаплагиофировые лавы Ключевской группы и породы щитового вулкана Ушковский.

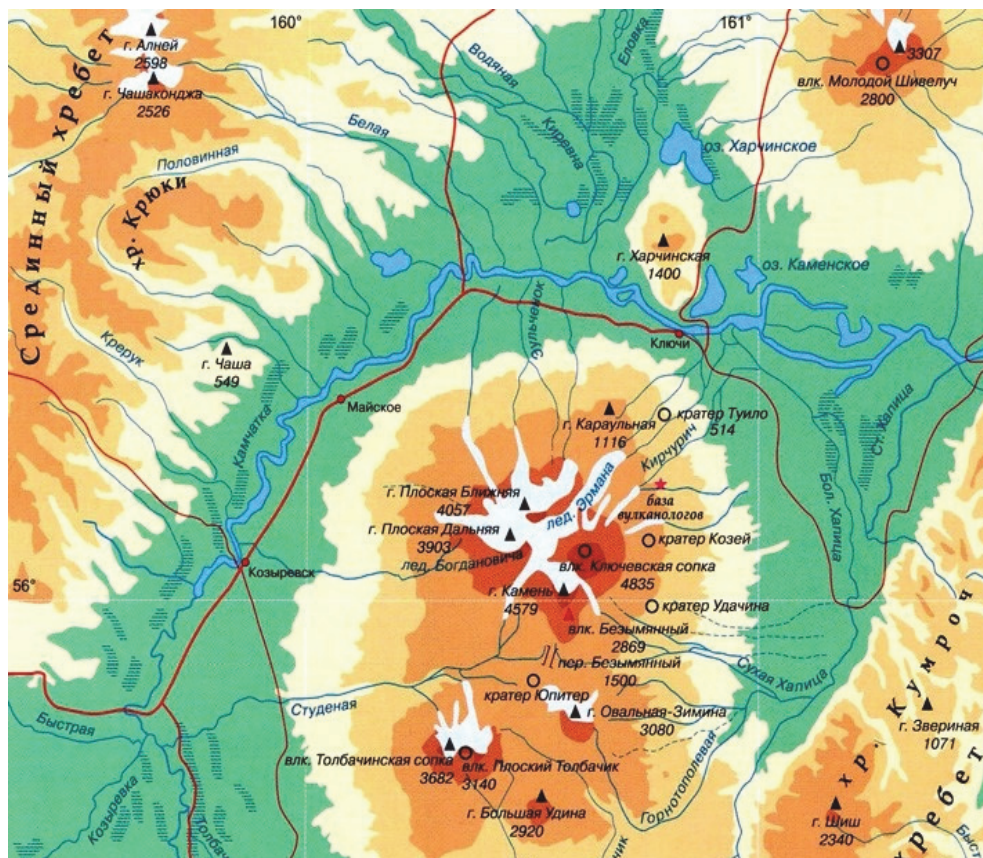


Рисунок. Ключевская группа вулканов на физической карте Камчатки
(Figure. Klyuchevskaya group of volcanoes on the physical map of Kamchatka)

Источник: Планета Земля: историческая география. URL: <http://geosfera.org>

Расположенный рядом с Ключевским вулкан Камень – второй по высоте вулкан на Камчатке. Склоны его крутые. Юго-восточный склон представлен глубоким цирком, образовавшимся в результате обвала, произошедшего 1000–1200 лет назад. Крутизна склонов здесь достигает 45–70°, поверхность представлена вулканическим шлаком. Северные и западные склоны начинаются с перевалов между вулканами Ушковский и Ключевской. Они также достаточно круты (35–40°) и почти полностью перекрыты льдом и фирном. Вершина вулкана труднодоступна [12].

Когда-то он был коническим стройным вулканом, но из-за произошедших колоссальных взры-

вов его восточная часть была оторвана и разбросана по окрестностям. Размеры крупных осколков-глыб составляют в поперечнике 5–10 м, но встречаются и более крупные. Так, в районе среднего течения Сухой Хапицы лежит глыба Амбон, отброшенная взрывом от своего «родного» места на 10 км. Ее поперечник составляет около 50 м, объем – около 16 000 м³. По размерам она больше пятиэтажного дома, а ее вес – 40–45 тыс. т. Глыба Амбон является памятником природы геологического характера.

Западный склон вулкана, не поврежденный взрывами, имеет обычный для конусовидных вулканов уклон – 30–35°. Восточный склон обрыва-

ется тремя крутыми цирками-уступами с уклоном 70–75°.

Группа Зиминых сопок относится к потухшим вулканам, располагается к юго-востоку от вулкана Безымянный и состоит из трех слившихся в единый массив стратовулканов: Овальная Зиминая, Острая Зиминая и Горный Зуб. Массив вытянут в субширотном направлении.

Вулкан Горный Зуб является самым древним и разрушенным, он расположен в восточной части массива, между ключом Тундровым и рекой Горно-Тополовой (Горно-Тополевой). Основанием вулкана служат мегаплагиофировые лавы. В его строении присутствуют пирокластические образования с прослоями лав базальта и андезитобазальта, которые выше сменяются оливин-пироксеновыми базальтами. Самую верхнюю часть составляют андезито-базальты и андезиты экструзий, причем место их внедрения смещается в западном направлении, в сторону вулканов Острая Зиминая и Овальная Зиминая.

Острая Зиминая в рельефе сравнительно четко выражена. Сложена плагиобазальтами и андезитами. Кратер ее заполнен экструзией андезитодацитов. Экструзия такого же состава отмечена в южном отроге этого вулкана [1].

Овальная Зиминая ограничивает вулканический массив с запада. Сложен вулкан пирокластикой, переслаивающейся с лавами дацитов. Кратер заполнен экструзией дацитового состава, обелиск которой хорошо выражен в рельефе. Одновременно с кратерной экструзией два купола дацитов образовались на ее южном склоне. По-видимому, с внедрением этих экструзий и довольно мощных эксплозий связано понижение, которое занял ледник Желтый, хотя В.А. Ермаков считает, что он приурочен к древнему кратеру вулканического массива Зиминых сопок. С этим же процессом он связывает мощную алуинитизацию пород, широко развитую на восточных и западных склонах сопки Овальная Зиминая и Острая Зиминая. Здесь В.А. Ермаковым обнаружен термальный источник с температурой 16–19 °С. Последний указывает на то, что гидротермальная деятельность на этих вулканах продолжается.

2. Современные представления о влиянии петрографических особенностей эффузивов на их физико-механические свойства

Установлено, что эффузивы четвертичного возраста характеризуются преимущественно пористой

и крупнопористой текстурой ($n-2 - 30\%$), свежестью неизмененных первичных минералов, слагающих породу. Главной их особенностью является наличие открытых, незаполненных вторичными минералами пор, образовавшихся при остывании магматического расплава. Их свойства зависят в большей степени от их текстуры – величины пористости и соотношения пор по размерам, чем от минералогического состава и структуры породы [2].

Установлено, что плотность эффузивов повышается с увеличением основности пород в ряду андезиты – базальты. Наблюдается тенденция четкого увеличения скоростей упругих волн от андезитов к базальтам. Изменение прочности может быть связано как с более высокой пористостью, так и с влиянием размера и характера распределения пор.

Проанализировано влияние размера пор на свойства. По мере увеличения размера пор от 1 до 5 мм установлено устойчивое снижение прочности от 120 до 50 МПа [3]. При пористости менее 8–12 % резко возрастает влияние структуры основной массы породы. Наблюдается закономерное снижение прочности по мере увеличения содержания вулканического стекла в микролитовых, офиловых, интерсертальных, гиалопилитовых структурах [4].

Настоящая работа предполагает обнаружить дополнительный материал по влиянию различных геологических факторов на свойства эффузивов.

В.М. Ладыгиным выявлено влияние текстуры (пористости) на свойства базальтов. В зависимости от размера пор выделены мелкопористые (0,1–1 мм), среднепористые (1–5 мм) и крупнопористые (> 5 мм) текстуры. По мере увеличения размера пор наблюдается снижение плотности (от 2,46 до 2,05 г/см³) и прочности (от 122 до 48 МПа), величина пористости возрастает от 13,9 до 28,3 %. На значение показателя V_p размер пор существенного влияния не оказывает [5].

Также установлено устойчивое изменение значений свойств по мере увеличения степени кристалличности породы. Так, плотность повышается от 1,58 до 2,65 г/см³, прочность – от 41 до 163 МПа, то есть в 4 раза, заметно увеличивается плотность твердой фазы (от 2,85 до 2,91 г/см³) и уменьшается пористость (от 45 до 9,5 %). Наибольшая величина пористости характерна для разностей с витрофировой структурой, то есть для пород верхних частей потоков. Следует отметить рез-

кое (с $6,4-7,2 \times 10^{-3}$ до $1,8 \times 10^{-3}$ СИ) снижение величины магнитной восприимчивости у разностей с витрофировой структурой, что может свидетельствовать о заметной дифференциации магнитной составляющей в потоках базальтов. Вместе с тем значение показателя V_p не зависит от структуры основной массы, оставаясь постоянным [6].

Базальты вулкана Ключевской очень разнообразны по петрофизическим свойствам, которые контролируются различными факторами. Плотность и прочность зависят от величины пористости, размера пор, типа структуры основной массы базальтов. Происходит увеличение плотностных (прочностных) характеристик с повышением пористости, от крупнопористых базальтов к мелкопористым и массивным разностям, от базальтов с гиалопилитовой основной массой к базальтам с офитовой структурой. Значения показателя V_p определяются наличием микротрещиноватости (за исключением базальтов с витрофировой структурой) и являются крайне низкими при данных значениях плотности и пористости. Плотность минеральных частиц коррелирует с химическим составом: снижается с увеличением содержания SiO_2 и уменьшением содержания Mg и CaO [7].

Существует корреляционная связь между плотностью твердой компоненты ρ_s (минеральной плотностью или плотностью твердой фазы) и содержанием SiO_2 . Первая работа по установлению взаимосвязи между содержанием SiO_2 и ρ_s была проведена О.М. Алыповой в 1967 г. [8].

Более детальные исследования отражены в работе В.М. Ладыгина, С.Н. Рычагова, Ю.В. Васильевой и Н.А. Румянцевой [9]. Был выявлен характер взаимосвязи SiO_2 и ρ_s : он зависит от состояния минеральной составляющей породы (соотношение кристаллической и стеклянкой фаз) и структуры основной массы. В общем случае получены следующие значения минеральной плотности для различных петрографических типов эффузивных пород: ультрабазиты характеризуются величиной ρ_s более $2,95-3,06 \text{ г/см}^3$; значения ρ_s базальтов лежат в интервале от $2,81-2,87$ до $2,95-3,09 \text{ г/см}^3$, андезито-базальтов – от $2,73-2,77$ до $2,81-2,87 \text{ г/см}^3$, андезитов – от $2,59-2,6$ до $2,73-2,77 \text{ г/см}^3$ [10].

Рассмотренные выше зависимости характеризуют вулканы неоген-четвертичного возраста, существенно не затронутые вторичными изменениями.

В работе [11] описаны зависимости скорости продольных волн от возраста породы. В данной работе говорится, что у эффузивов при кристаллизации образуются микротрещины, которые вызывают резкое снижение величины упругих волн. Этот эффект исчезает с увеличением возраста эффузивов, и базальты возраста более 150 000–200 000 лет обладают большими скоростями.

3. Сравнительная характеристика эффузивных пород вулканов Зимины и Камень

Вулканы Зимины и Камень относятся к группе Ключевских вулканов и располагаются в непосредственной близости друг от друга, но в результате различного происхождения имеют разный химический состав и физико-механические свойства пород, образующих данные вулканы.

По результатам, полученным в процессе исследования данных эффузивов, можно сделать вывод, что вулканы состоят из базальтов и андезито-базальтов, однако у эффузивов вулкана Камень более кислый состав – андезито-базальтов больше, чем базальтов, соотношение 7:3. У вулкана Зимины соотношение андезито-базальтов к базальтам 6:9.

Стоит отметить, что был обнаружен образец с гидротермальными преобразованиями (zim16–18), также в ходе маршрутов был обнаружен ледник Желтый, характерный цвет которого косвенно указывает на гидротермальную активность вулкана Зимины. При изучении образцов с вулкана Камень подобных изменений не наблюдалось. Отсюда можно сделать вывод, что и по пористости пород данные вулканы отличаются. Средние показатели пористости пород с вулкана Зимины составляют: для первой группы пород – 17,4 %, для второй – 11,8 %, для третьей – 6,0 %, для четвертой – 12,0 % и для пятой – 12,6 %. Для вулкана Камень характерны следующие величины: для первой группы пород – 4,2 %, для второй – 8,8 %, для третьей – 6,2 %, для четвертой – 10 %. Это свидетельствует о том, что при извержении вулкана Зимины было большее флюидовыделение.

Сравнение скоростей продольных волн выявило, что у образцов с вулкана Камень средние показатели скоростей ниже, чем у образцов с вулкана Зимины. Один из образцов, а именно кам09–07, имеет скорость 4,9 км/с, такое высокое значение связано с низкой пористостью данного образца. А высокие скорости у образцов zim16–14 и zim16–11 связаны с более древним возрастом этого потока.

Предположительно, у вулкана Зимина есть лавовые потоки возраста Q₄, но есть и более древние – возраста Q₂₋₃ [12]. У вулкана Камень отсутствуют об-

разцы с резко отличающимися, высокими скоростями – это признак того, что все изученные потоки возраста Q₄ (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Физические и физико-механические свойства эффузивных пород вулкана Зимина
[Table 1. Physical and physico-mechanical properties of effusive rocks of the Zimin volcano]

Группы [Groups]	Вулкан Зимина [Zimin volcano]	Плотность воздушно-сухого грунта [Density of air-dry soil]	Плотность твердой компоненты [Density of solid components]	Пористость [Porosity]	Скорость продольных волн по оси керна [The speed of longitudinal waves along the core axis]	Прочность на одноосное сжатие в воздушно-сухом состоянии [Uniaxial compression strength in air-dry condition]	Структура основной массы породы [The structure of the main mass of the breed]	Количество образцов [Amount of samples]	
									№ пробы [Sample number]
Базальты [Basalts]	I	zim16-09	2,70	3,08	12,8	4,1	140	Интерсертальная [Intersertal]	2
		zim16-03	2,37	3,02	21,9	4,1	69	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	4
		Среднее [Average]	2,54	3,05	17,4	4,1	105	–	–
	II	zim16-10	2,65	2,94	8,4	3,8	45	Микрофитовая [Microophyte]	3
		zim16-42	2,67	2,95	8,8	3,6	175	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	4
		zim16-30	2,60	2,94	18,2	3,3	133	Интерсертальная [Intersertal]	3
		Среднее [Average]	2,64	2,94	11,8	3,6	118	–	–
	III	zim16-14	2,76	2,93	5,4	5,5	316	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	3
		zim16-11	2,71	2,90	6,5	5,4	169	Интерсертальная [Intersertal]	3
Среднее [Average]		2,74	2,92	6,0	5,5	243	–	–	
Андезитово-Базальты [Andesite-basalts]	IV	zim16-34	2,51	2,86	11,8	2,5	164	Интерсертальная [Intersertal]	2
		zim16-26	2,73	2,88	4,4	3,2	49	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	1
		zim16-28	2,20	2,84	21,9	3,1	67	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	3
		Среднее [Average]	2,48	2,86	12,7	2,9	93	–	–
	V	zim16-04	2,30	2,80	17,9	2,9	92	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	3
		zim16-23	2,30	2,77	16,8	2,5	23	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	3
		zim16-45	2,45	2,75	10,3	4,2	120	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	4
		zim16-46	2,57	2,73	5,5	2,2	239	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	3
		Среднее [Average]	2,41	2,76	12,6	3,0	119	–	–
	VI	zim16-18	2,35	2,99	14,5	4,1	72	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	3

Примечание: zim16-03: zim – вулкан Зимина, 16 – номер экспедиции, 03 – номер пробы.
 [Note: zim16-03: zim – Zimin volcano, 16 – expedition number, 03 – sample number.]

Физические и физико-механические свойства эффузивных пород вулкана Камень
 [Table 2. Physical and physico-mechanical properties of effusive rocks of the Kamen volcano]

	Группы [Groups]	Вулкан Камень [Kamen volcano]	Плотность воздушно- сухого грунта [Density of air-dry soil]	Плотность твёрдой компо- ненты [Density of solid compo- nents]	Пори- стость [Porosi- ty]	Скорость продоль- ных волн по оси керна [The speed of longitu- dinal waves along the core axis]	Прочность на одноосное сжатие в воз- душно-сухом состоянии [Uniaxial com- pression strength in air- dry condition]	Структура основной массы породы [The structure of the main mass of the breed]	Количе- ство образцов [Amount of samples]
Базальты [Basalts]	I	кам09–14	2,73	3,08	4,2	2,2	113	Офитовая [Oophyte]	2
		Среднее [Average]	2,73	3,08	4,2	2,2	113	–	–
	II	кам09–20	2,73	2,94	8,4	2,9	140	Интерсерральная [Intersertal]	6
		кам09–26	2,67	2,94	9,1	3,3	103	Интерсерральная [Intersertal]	4
		Среднее [Average]	2,70	2,94	8,8	3,1	122	–	–
Андезит-базальты [Andesite-basalts]	III	кам09–13	2,72	2,88	6,0	2,1	130	Интерсерральная [Intersertal]	5
		кам09–22	2,69	2,88	6,2	2,4	76	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	3
		кам09–25	2,58	2,86	9,0	3,0	99	Интерсерральная [Intersertal]	3
		кам09–07	2,76	2,85	3,5	4,9	154	Интерсерральная [Intersertal]	2
		Среднее [Average]	2,69	2,87	6,2	3,1	115	–	–
	IV	кам09–23	2,39	2,83	15,7	2,8	68	Интерсерральная [Intersertal]	5
		кам09–08	2,59	2,82	8,3	2,6	112	Офитовая [Oophyte]	7
		кам09–24	2,65	2,82	5,9	3,2	44	Гиалопилитовая [Hyalopilitic]	3
		Среднее [Average]	2,54	2,82	10,0	2,9	75	–	–

Примечание: кам09–14: кам – вулкан Камень, 16 – номер экспедиции, 03 – номер пробы.

[Note: kam09–14: kam – Kamen volcano, 16 – the number of the expedition, 03 – sample number.]

При изучении прочностных характеристик отобранных образцов особых закономерностей и зависимостей обнаружено не было. Установлено, что прочность не зависит от структуры основной массы. Изучение шлифов отобранных образцов пород под микроскопом показало, что у вулкана Камень больше пород с интерсерральной структурой, в то время как для вулкана Зимины характерны породы с гиалопилитовой основной массой. У вулкана Зимины андезит-базальты имеют преимущественно гиалопилитовую структуру, за исключением образца zim16–34, который имеет ин-

терсерральную структуру. Базальты имеют гиалопилитовую структуру. Исключение составляют лишь эффузивы zim16–11 и zim16–09, у которых интерсерральная структура, и zim16–10 с микроофитовой структурой. У вулкана Камень наблюдается обратная зависимость: андезит-базальтовые породы имеют интерсерральную структуру основной массы, за исключением кам09–22 и кам09–24 с гиалопилитовой структурой основной массы и кам09–08 с офитовой структурой основной массы. Стоит отметить, что базальты вулкана Камень также представлены интерсерральной

структурой основной массы, исключение – образец кам09–14, имеющий офитовую структуру.

Исходя из полученных в результате исследований показателей, можно сделать следующий вывод: эффузивы вулкана Камень преимущественно представлены породами с интерсертальной структурой основной массы, а образцы с вулкана Зими́на – гиалопилитовой структурой основной массы.

Основываясь на полученных графиках зависимостей скоростей продольных волн от плотности пород и зависимостей прочности пород от плотности, можно заключить, что:

- 1) породы вулкана Камень плотнее;
- 2) разброс полученных значений физико-механических свойств для вулкана Камень минимальный, что свидетельствует о более постоянном составе, а следовательно, и более четко выраженной зависимости прочности и скорости продольных волн от плотности. Значения показателей физико-механических свойств эффузивных пород вулкана Зими́на имеют большой разброс, и следовательно, менее четко выраженную зависимость прочности и скорости продольных волн от плотности;

3) показатели прочности не зависят от структуры основной массы как на вулкане Камень, так и на вулкане Зими́на.

Графики зависимостей скоростей продольных волн от пористости пород и зависимостей прочности пород от ее пористости свидетельствуют о наличии:

- 1) зависимости скорости от пористости у эффузивов с интерсертальной структурой;
- 2) зависимости прочности от пористости у эффузивов, отобранных с вулкана Зими́на, имеющих гиалопилитовую структуру.

Заключение

В ходе исследования были изучены физико-механические свойства эффузивов, отобранных с расположенных рядом вулканов Зими́на и Камень. Проведено сравнение физико-механических свойств и строения эффузивов данных вулканов, для чего были изучены 25 образцов: 15 – с вулкана Зими́на и 10 – с вулкана Камень. На основе полученных данных установлено, что:

- 1) вулкан Камень преимущественно сложен андезито-базальтами, а вулкан Зими́на базальтами;
- 2) эффузивы с вулкана Зими́на преимущественно имеют гиалопилитовую структуру основной мас-

сы, а эффузивы вулкана Камень – интерсертальную структуру основной массы;

- 3) эффузивы вулкана Зими́на более пористые, чем эффузивы вулкана Камень;
- 4) средние скорости продольных волн у эффузивов вулкана Зими́на выше, чем у эффузивов вулкана Камень;
- 5) на вулкане Зими́на обнаружены гидротермальные явления;
- 6) у вулкана Зими́на присутствуют потоки, предположительно, возраста Q_{2-3} , на что косвенно указывают высокие скорости продольных волн у эффузивных пород вулкана; у вулкана Камень возраст потоков соответствует Q_4 ;
- 7) прочность пород не зависит от структуры основной массы;
- 8) зависимость скорости продольных волн от пористости наблюдается у эффузивов с интерсертальной структурой;
- 9) зависимость прочности от пористости наблюдается у эффузивов, отобранных с вулкана Зими́на и имеющих гиалопилитовую структуру.

Список литературы

1. Фролова Ю.В., Чернов М.С. Формирование глинистых минералов в вулканогенных породах при гидротермальном литогенезе // Глины-2015: тезисы и материалы Третьего Всероссийского совещания. М., 2015. С. 70–72.
2. Ладыгин В.М., Округин В.М. Петрофизические свойства базальтов Большого трещинного Толбачинского извержения // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 1998. № 3. С. 45–49.
3. Reid M., Sisson Th., Brien D. Volcano collapse promoted by hydrothermal alteration and edifice shape, Mount Rainier, Washington // *Geology*. 2011. Vol. 29. No. 9. Pp. 779–782.
4. Ладыгин В.М., Фролова Ю.В. Особенности петрофизических свойств эффузивов Ключевского вулкана // Вестник МГУ. 2012. № 6. С. 44–48
5. Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Droznin V.A., Chernykh E.V., Puzankov M.Y., Vergasova L.P. Geysers Valley Hydrothermal System (Kamchatka): Recent Changes Related to Landslide of June 3, 2007 // *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25–29 April 2010*. URL: https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGA_standard/WGC/2010/1515.pdf
6. Zerkal O.V., Gvozdeva I.P. Slope stability analysis in modern hydrothermal active areas // *Global View of Engineering Geology and Environment: Proc. of the Internet. Symp. and 9th Asian Regional Conf. of IAEG (Beijing, 23–25 September 2013)*. London: CRC Press (Taylor & Francis Group), 2013. Pp. 225–228.

7. Montanaro C., Scheu B., Gudmundsson M., Vogfjord K., Reynolds H., Durig T., Strehlow K., Rott S., Reuschle Th., Dingwell D. Multidisciplinary constraints of hydrothermal explosions based on the 2013 Gengissig lake event, Kverkfjoll volcano, Iceland // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.043/>

8. Семенов В.И. В краю горячих источников. Петропавловск-Камчатский: Дальиздат, Камчатское отделение, 1988. 143 с.

9. Ладыгин В.М., Макаров А.А., Фролова Ю.В. Использование показателя плотности твердой фазы для классификации эффузивов // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2002. № 1. С. 57–60.

10. Фролова Ю.В., Ладыгин В.М., Рычагов С.Н. Закономерности преобразования состава и свойств вулканогенных пород в гидротермально-магматических

системах Курило-Камчатской островной дуги // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. 2011. № 6. С. 52–60.

11. Алыпина О.М. Некоторые данные о физических свойствах вулканических пород района Ключевской группы вулканов // *Бюллетень вулканологических станций*. № 43. М.: Наука, 1967. С. 56–63

12. Кириллов В.И. Камчатка: справочник туриста. Петропавловск-Камчатский: РИО КОТ, 1994. 228 с.

Для цитирования

Беленикин В.В., Пулькова А.С. Сравнительная характеристика физико-механических свойств андезитобазальтов вулканов Зимины и Камень // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 2. С. 184–192. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-184-192>

Research paper

Comparative characteristics of the physical and mechanical properties of andesite-basalts of Zimin and Kamen volcanoes

Vladimir V. Belenikin, Alina S. Pulkova

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

Article history:

Received: February 24, 2019

Revised: April 20, 2019

Accepted: May 15, 2019

Keywords:

physical and mechanical properties of rocks; rocky soils; volcanic effusive

The physical and mechanical properties of rocks are called those that determine their behavior under the influence of external forces (loads) and manifest themselves in resistance to destruction and deformation. The property of rocks to resist destruction and the formation of large residual deformations under the influence of the load or, more precisely, to perceive, without breaking down within certain limits and conditions, certain loads are called strength, and their property to change under load the shape of folding and volume is deformation. These properties express and evaluate the strength and deformation indicators. The article compares the physical and mechanical properties and structure of the effusive volcanoes of Zimin and Kamen, which are located on the Kamchatka Peninsula. The physical and mechanical properties of the effusive rocks of these volcanoes are rather well studied, which allows to make their detailed characterization, as well as to compare the rocks with each other, highlighting the similarities and differences. By analyzing the data obtained, it is possible to use this information in similar studies, identifying the results or explaining them if there are differences. The conducted studies allow to more accurately explain the influence of structural features on changes in the physical and mechanical properties of the rocks of the Kamen and Zimin volcanoes.

References

1. Frolova YuV, Chernov MS. The formation of clay minerals in volcanogenic rocks during hydrothermal lithogenesis. *Clays-2015: Materials and Abstracts of Third All-Russian Meeting*. Moscow; 2015. pp. 70–72. (In Russ.)

2. Ladygin VM, Okrugin VM. Petrophysical properties of basalts of the Great Cracked Tolbachinsky Eruption (Kamchatka). *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 1998;(3): 45–49. (In Russ.)

3. Reid M, Sisson Th, Brien D. Volcano collapse promoted by hydrothermal alteration and edifice shape, Mount Rainier, Washington. *Geology*. 2011;29(9): 779–782.

4. Ladygin VM, Frolova YuV. Peculiarities of petro-physical properties of effusive waters of the Klyuchevsky

Vladimir V. Belenikin – master student of the Academy of Engineering; didiftmf@gmail.com

Alina S. Pulkova – master student of the Academy of Engineering.

Volcano. *Moscow State University Bulletin*. 2012;(6): 44–48. (In Russ.)

5. Kiryukhin AV, Rychkova TV, Droznin VA, Chernykh EV, Puzankov MY, Vergasova LP. Geysers Valley Hydrothermal System (Kamchatka): Recent Changes Related to Landslide of June 3, 2007. *Proceedings of World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25–29 April 2010*. Available from: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2010/1515.pdf>

6. Zerkal OV, Gvozdeva IP. Slope stability analysis in modern hydrothermal active areas. *Global View of Engineering Geology and Environment: Proc. of the Internet. Symp. and 9th Asian Regional Conf. of the IAEG (Beijing, 23–25 September 2013)*. London: CRC Press (Taylor & Francis Group); 2013. pp. 225–228.

7. Montanaro C, Scheu B, Gudmundsson M, Vogfjord K, Reynolds H, Durig T, Strehlow K, Rott S, Reuschle Th, Dingwell D. Multidisciplinary constraints of hydrothermal explosions based on the 2013 Gengissig lake event, Kverkfjoll volcano, Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.11.043/>.

8. Semenov VI. *At the edge of hot springs*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Dalizdat, Kamchatka branch; 1988. (In Russ.)

9. Ladygin VM, Makarov AA, Frolova YuV. Using the density indicator of the solid phase for the classification of effusive. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2002;(1): 57–60. (In Russ.)

10. Frolova YuV, Ladygin VM, Rychagov SN. Patterns of conversion composition and properties of volcanogenic rocks in hydrothermal-magmatic systems of the Kuril-Kamchatka island arc. *Moscow State University Bulletin. Series 4: Geology*. 2011;(6): 52–60. (In Russ.)

11. Alypova OM. Some data on the physical properties of their volcanic rocks in the area of the Klyuchevskaya volcano group. *Bulletin of volcanological stations*. 1967;(43): 56–63. (In Russ.)

12. Kirillov VI. (director of the publication). *Kamchatka: tourist guide*. Petropavlovsk-Kamchatsky: RIO KOT Publ.; 1994. (In Russ.)

For citation

Belenikin VV, Pulkova AS. Comparative characteristics of the physical and mechanical properties of andesite-basalts of Zimin and Kamen volcanoes. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 184–192. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-184-192>. (In Russ.)



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-193-203

УДК 504.55.054:622(470.6)

Научная статья

Использование остаточной прочности пород в несущих конструкциях при подземной добыче руд

В.И. Голик

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, *Российская Федерация, 362002, Владикавказ, ул. Маркова, 93а*
Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Российская Федерация, 362021, Владикавказ, ул. Николаева, 44

Ю.В. Дмитрак, О.З. Габараев

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
Российская Федерация, 362021, Владикавказ, ул. Николаева, 44

Ю.И. Разоренов

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Российская Федерация, 346428, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

История статьи:

Поступила в редакцию: 11 марта 2019

Доработана: 06 мая 2019

Принята к публикации: 21 мая 2019

Ключевые слова:

массив; напряжения; прочность; порода; подземная разработка; качество; безопасность

Актуальность исследования объясняется необходимостью совершенствования технологических процессов, вызванной усложнением условий разработки рудных месторождений, увеличением глубины разработки, применением мощной техники и возрастанием напряжений в массивах рудовмещающих пород. Необходимость минимизации риска в горных разработках требует разработки и использования инструментария управления массивом. Целью настоящего исследования является систематизация теоретических и практических сведений об использовании остаточной несущей способности разрушенных пород в процессе подземной разработки месторождений для совершенствования применяемых методов управления геомеханикой рудовмещающих массивов. Комплекс исследований включает в себя аналитические, натурные, лабораторные и теоретические методы, которые применяются для выявления феномена использования остаточной несущей способности разрушенных пород. Для достижения поставленной цели систематизированы сведения об использовании несущих перекрытий из нетронутых и разрушенных руд и пород, а также других материалов. Дана краткая характеристика научного обеспечения горнотехнических задач. Охарактеризован феномен использования остаточной несущей способности нарушенных пород в составе возникающих в горном массиве конструкций. Проведен критический анализ концепций управления массивом. Рассмотрены альтернативные варианты создания конструкций с целью решения задач снижения риска для здоровья работающих и повышения качества руд. Представлена новая типизация конструкций с использованием остаточной прочности разрушенных пород. Доказано, что при подземной разработке месторождений существует возможность реализовать остаточную несущую способность разрушенных пород для создания конструкций с заданными свойствами, что способствует решению задач охраны труда и повышения качества руд.

Голик Владимир Иванович – главный научный сотрудник ГФИ ВНЦ РАН; профессор кафедры горного дела СКГМИ (ГТУ), доктор технических наук, профессор; v.i.golik@mail.ru

Дмитрак Юрий Витальевич – ректор СКГМИ (ГТУ), доктор технических наук, профессор.

Габараев Олег Знаурович – заведующий кафедрой горного дела СКГМИ (ГТУ), доктор технических наук, профессор.

Разоренов Юрий Иванович – исполняющий обязанности ректора ЮРГПУ (НПИ), доктор технических наук, профессор.

© Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Разоренов Ю.И., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

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

Введение

Безопасность горных работ и качество добываемого минерального сырья зависят от рационального использования свойств разрабатываемого рудовмещающего массива при использовании расчетов на основе геодинамической ситуации [1–3].

Устойчивость выработок горного комплекса обеспечивается регулированием состояния структурных минеральных отдельностей в зонах влияния выработанного пространства на рудовмещающий массив.

Большинство рудных месторождений локализируются в анизотропных скальных массивах сложной структуры, поэтому управление ими с использованием геомеханических факторов особенностей проявления горного давления и методов строительной механики формирует важную научную и практическую задачу.

История разработки месторождения подземным способом представляет собой управляемое создание несущих и разделяющих конструкций на основе использования остаточной несущей способности разрушенных пород.

Целью настоящего исследования является систематизация сведений о теории и практике использования остаточной несущей способности разрушенных пород в процессе подземной разработки рудных месторождений в условиях ураново-добывающих предприятий Северного Казахстана на месторождениях Восток, Маньбай, Ишимское, Заозерное.

1. Методы исследования

При исследовании технологий управления скальными массивами используют системный подход, включающий в себя комплекс исследований: аналитические (по литературным данным), натурные (маркшейдерские съемки, измерение напряжений и деформаций), лабораторные (моделирование на материалах) и теоретические (метод конечных элементов, термодинамический, энергетический и др.).

Учитывая уникальность каждого месторождения, приоритетом пользуются методы с экспериментальным подтверждением расчетных параметров. Применяемые технологии типизируются по признаку использования остаточной несущей способности разрушенных пород.

Диапазон исследований данного направления включает в себя расчеты строительных конструк-

ций, динамику конструкций и сооружений, аналитические и численные методы расчета конструкций, расчеты на устойчивость.

2. Результаты

В общем случае с увеличением глубины разработки рудных месторождений напряжения в массивах рудовмещающих пород возрастают. Недооценка горного давления приводит к разрушению массивов вплоть до выхода на дневную поверхность с катастрофическими последствиями.

Местом зарождения и развития негативных явлений являются очистные выработки, характеризующиеся большими размерами и объемами пустот. Инструментарий управления массивом включает в себя обрушение вмещающих пород, оставление пустот без заполнения и заполнение материалом чаще всего твердеющей закладочной смесью. Методы управления горным давлением сводятся к использованию прочности несущих перекрытий из нетронутых и разрушенных руд и пород.

Обрушение вмещающих пород получает приоритетное развитие вследствие высокой степени механизации и меньших затрат. Его недостатки особенно заметны при глубине работ от 500 м: трудность управления процессом обрушения, повышенные потери, разубоживание и потенциально возможное разрушение массива вплоть до дневной поверхности.

Оставление очистных выработок без заполнения материалом применяют при отработке рудных тел, не оказывающих влияния на земную поверхность.

Лучшие показатели эксплуатации недр обеспечивает заполнение пустот твердеющей закладочной смесью. Для снижения стоимости смесей и расширения диапазона их применения закладку приготавливают с заменой товарных компонентов альтернативными доступными материалами. Ограниченное применение имеют перекрытия из неминеральных материалов – дерева, металла и т.п.

Решению горнотехнических задач посвящены труды М.И. Агошкова, Д.М. Бронникова, В.Р. Именитова, В.А. Шестакова и других исследователей. Особенности поведения массивов при техногенном вмешательстве исследованы в работах В.Д. Слесарева, С.В. Ветрова, К.В. Руппштейта, С.Г. Авершина и др.

В настоящее время большинство методов решения горно-геологических задач основывается на том, что в дискретном массиве пород форми-

руется гравитационно-тектонически-структурное поле напряжений (см., например, работы А.А. Борисова, Г.Н. Кузнецова, С.В. Ветрова). Дискретность массива предполагает механическое взаимодействие структурных элементарных блоков, чем объясняется феномен остаточной несущей способности нарушенных пород [4–5]. Этот феномен ежедневно подтверждается горной практикой в виде образования в выпускных устройствах рудных кусков. Склонность к самозаклиниванию отдельностей увеличивается при увеличении их размеров.

Заклинивание соседних элементарных отдельностей происходит за счет прижатия их по боковым граням. Смещаясь вниз, соседствующие отдельности прижимаются друг к другу с раскрытием в нижней части вертикального контакта и сжатием в верхней части. В контактной зоне прижатия возникают напряжения. Если они не превышают предела прочности пород при сжатии, то возникает возможность проявления остаточной несущей способности нарушенных пород, и образовавшаяся породная конструкция обеспечивает безопасный режим работы.

В противном случае временная породная конструкция разрушается до тех пор, пока не возникают новые условия для заклинивания, поэтому при разработке таких месторождений устойчивость рудовмещающих массивов и земной поверхности над ними обеспечивается путем компенсационного заполнения технологических пустот материалами. Поскольку дискретные материалы допускают усадку, а при подработке смещаются в сторону подработки, закладка ими не гарантирует успех. Надежное сохранение безопасных условий разработки обеспечивается при заполнении пустот твердеющими закладочными смесями.

Обоснованию параметров такой технологии посвящены труды Д.М. Бронникова, М.И. Цыганова, Л.А. Крупника, А.П. Требукова и др. Стремление обеспечить надежное управление горным давлением, кроме проблемы повысить безопасность труда, объясняется желанием уменьшить объем при매шивания к руде пустых пород. Поэтому целью управления состоянием массива является уменьшение высоты свода естественного равновесия.

М.М. Протоdjяконов доказал, что в соответствующих условиях в выработку обрушиться могут только породы, заключенные в пределах свода, то есть оптимальным является сохранение плоской формы кровли.

Последующие исследования уточняли возможности достижения плоской кровли при самозаклинивании структурных блоков. Предлагаемые теории различались представлениями о сущности кровли.

В.Д. Слесарев представлял породную конструкцию как балку, А.А. Борисов – как слой пород, а С.В. Ветров – как нижний ряд заклинившихся отдельностей. От позиционирования объекта исследования зависит выбор метода определения геомеханических параметров (табл. 1).

Общим для всех методов является определение безопасности выработки как равенства между механической прочностью нижнего ряда элементов перекрытия и нагрузкой породами в ее пределах.

Сохранение рудовмещающих массивов обеспечивается регулированием уровня технологических напряжений на участках месторождения, увязкой процессов выемки руды во времени и пространстве и степени ее подготовленности к добыче, учетом геодинамических условий. В скальных породах на контуре горных выработок ослабленность пород уменьшается. В зоне нарушенных пород коэффициент ослабления снижается 0,25 до 0,04. Мощность зоны ослабления вокруг выработок составляет от 0,5 до 10 м. Внутри зон выделяется приконтурная зона, в пределах которой прочность уменьшается в 1,5–6,0 раз. Вокруг пустот формируется зона неупругих деформаций, в которых протекают пластические деформации и разрушение пород. Эти характеристики определяют поведение массивов при разработке месторождений.

Анализ научно-практического опыта погашения пустот при разработке рудных месторождений позволяет резюмировать, что [6–8]:

- условием эффективности управления горными массивами является геомеханическая сбалансированность напряженно-деформированных дискретных сред;

- перспективные способы управления массивами связаны с использованием остаточной несущей способности структурных отдельностей.

Устойчивость выработок обеспечивается, если в породах кровли возникает трехшарнирная арка (рис. 1).

Арка устойчива, если кровля не нарушена поперечными разломами и трещинами. Устойчивость выработок зависит от соотношения горизонтальных и вертикальных размеров структурных блоков. Потеря несущей способности несущего слоя пород наступает при скалывании боковых граней структурных блоков.

Методы расчета геомеханических параметров
 [Table 1. Methods for calculating geomechanical parameters]

Характеристика массива [Array characteristic]	Методы [Methods]		
	Геомеханические (классическая механика) [Geomechanical (classical mechanics)]	Инженерные (строительная механика, сопротивление материалов и т.п.) [Engineering (building mechanics, resistance of materials, etc.)]	
		Несущий элемент [Carrier element]	Научные гипотезы [Scientific hypotheses]
Квазисплошной с гравитационным полем напряжений [Quasi-continuous with a gravitational stress field]	Механика сплошной среды, вероятностно-статистические методы [Continuum mechanics, probabilistic statistical methods]	Несущая способность материала кровли [The bearing capacity of the roofing material]	Своды давления (В.Д. Слесарев), своды обрушения (М.М. Протодьяконов, И.М. Цимбаревич, Н.М. Покровский и др.) [Pressure vaults (V.D. Slesarev), mordias vaults (M.M. Protodyakonov, I.M. Tsimbarevich, N.M. Pokrovsky et al.)]
Квазисплошной с гравитационно-тектоническо-структурным полем [Quasi-continuous with a gravitational-tectonic-structural field]		Плита или балка в кровле [Slab or beam in the roof]	
		Несущая способность тектонически нарушенных пород [The bearing capacity of tectonically disturbed rocks]	
Дискретный с гравитационно-тектоническо-структурным полем [Discrete with a gravitational-tectonic-structural field]	Механика дискретной среды, вероятностно-статистические методы [Discrete medium mechanics, probabilistic-statistical methods]	Плита или балка с трещиной [Slab or beam with crack]	Зоны обрушений (А.А. Борисов), свободные консоли (Г.Н. Кузнецов) [Collapse zones (A.A. Borisov), free consoles (G.N. Kuznetsov)]
		Плита или балка [Slab or beam]	
		Трехшарнирная арка с блочной структурой [Three-hinged arch with block structure]	Свод равновесия (С.В. Ветров) [Balance of equilibrium (S.V. Vetrov)]

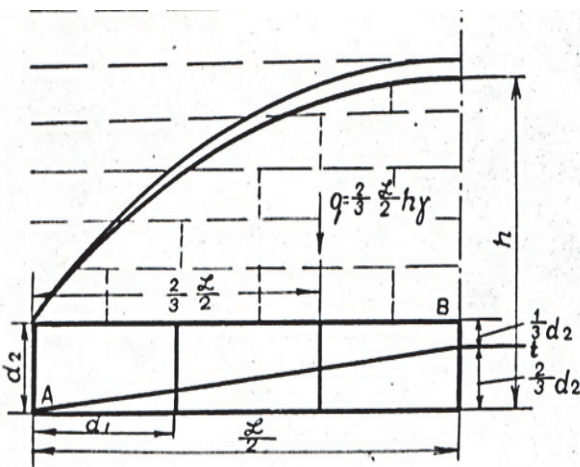


Рис. 1. Схема образования жесткой шарнирной арки:
 d_1 и d_2 – горизонтальный и вертикальный размеры
 структурных блоков

[Figure 1. Scheme of formation of a rigid articulated arch:
 d_1 and d_2 – horizontal and vertical dimensions of structural blocks]

Устойчивость конструкций заклинившихся пород в кровле выработок определяется величиной их эквивалентных пролетов. Критерием устойчивости плоской кровли является условие:

$$L_{\phi} \leq L_{\pi},$$

где L_{ϕ} – фактической эквивалентный пролет кровли выработки, м; L_{π} – предельно допустимый эквивалентный пролет обнажения плоской кровли, м.

Если по условию устойчивости кровли отработка рудного тела сплошным забоем затруднительна, оно делится на отдельные участки, размеры каждого из которых удовлетворяют условию.

Критерием безопасности погашения выработанного пространства является область его опасного влияния – часть массива пород, где над выработками возможно развитие опасных напряжений и деформаций. Если в зону опасного влияния попадают поверхностные сооружения, эксплуатируемые горные выработки и подлежащие отработке рудные тела, выработанное пространство погашается закладкой.

При увеличении ширины горной выработки с плоской кровлей до предельного значения породы кровли обрушаются. Над выработкой образуется параболический свод – свод естественного равновесия, дальше которого обрушение не развивается. Пролет бесконечной длины вы-

работки, высота свода естественного равновесия и инженерно-геологические характеристики массива взаимосвязаны:

$$\left(\frac{2 R_{сж} k_o d_1 h_{св}}{\gamma g (2H - h_{св})} \right)^2 = h_{св}^2 \left(\frac{l}{2} \right)^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^4,$$

где d_1 – горизонтальный размер структурного блока, м; $R_{сж}$ – прочность горных пород на сжатие, Па; k_o – коэффициент структурного ослабления пород; $h_{св}$ – высота свода естественного равновесия, м; γ – плотность горных пород, кг/м³; g – ускорение свободного падения; H – глубина залегания выработки, м; l – пролет выработки бесконечной длины, м.

Связь между максимально допустимым пролетом плоской кровли бесконечной длины выработки, высотой соответствующего этой выработке свода естественного равновесия и инженерно-геологическими характеристиками пород описывается выражением

$$\left(\frac{3 R_{сж} k_o d_1^2}{2 k_3 \gamma h_{св} g} \right)^2 = d_1^2 \left(\frac{L^o}{2} \right)^2 + \left(\frac{L^o}{2} \right)^4,$$

где $R_{сж}$ – прочность горных пород на сжатие, Па; k_o – коэффициент структурного ослабления пород; d_1^2 – вертикальный размер структурного блока, м; γ – плотность горных пород, кг/м³; g – ускорение свободного падения; $h_{св}$ – высота свода естественного равновесия, м; L^o – предельно допустимый пролет плоской кровли.

Оценка технологий с точки зрения учета геомеханической ситуации позволяет как сократить расходы на содержание выработок, так и минимизировать риск эксплуатации ответственных объектов, к которым относятся транспортные тоннели.

Одним из направлений повышения качества добываемого минерального сырья и снижения опасности подземных горных работ является использование искусственных потолочин, создаваемых в процессах инъецирования пород, строительства сплошной несущей и «облегченной» потолочины, а также упрочнения замагазинированной руды цементным раствором [9–12] (рис. 2).

Сплошная несущая потолочина сооружается в ходе выемки руд системой горизонтальных слоев с закладкой твердеющими смесями. Нагрузка пород на нее составляет около 80 % – на участке активного сдвижения, 60 % – на участке пассивного сдвижения, а высота зон сдвижения не превышает 30 м.

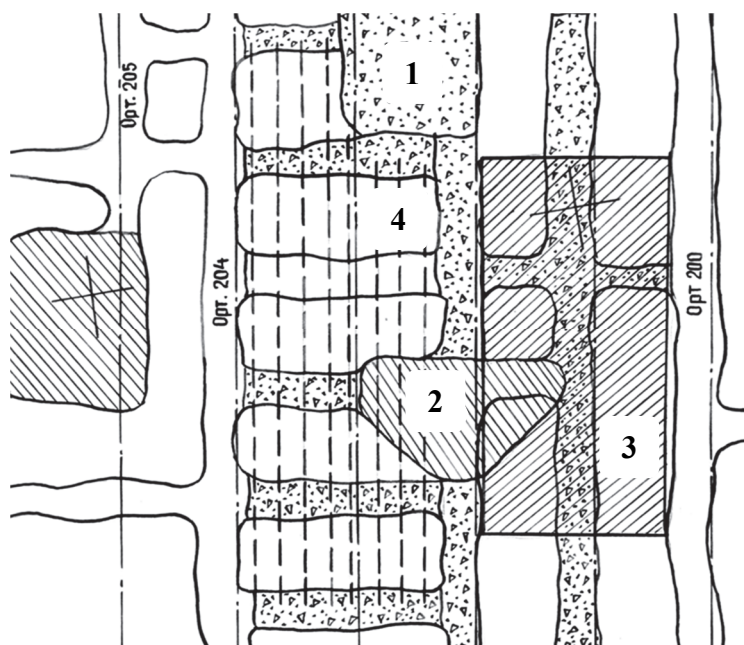


Рис. 2. Искусственная потолочина:

1 – твердеющие смеси; 2 – инъецированные породы;

3 – сплошная железобетонная потолочина; 4 – облегченная потолочина с железобетонными штангами

[Figure 2. Artificial ceiling:

1 – hardening mixtures; 2 – injected rocks; 3 – solid reinforced concrete ceiling; 4 – lightweight ceiling with reinforced concrete rods]

Искусственная потолочина представляет собой плиту, жестко защемленную во вмещающих породах и предельно нагруженную возле опор и в середине пролета.

Породно-бетонная потолочина создается путем инъектирования пород цементным раствором по скважинам (рис. 3). Потолочина с арматурой усиливает несущие функции за счет арматуры (рис. 4).

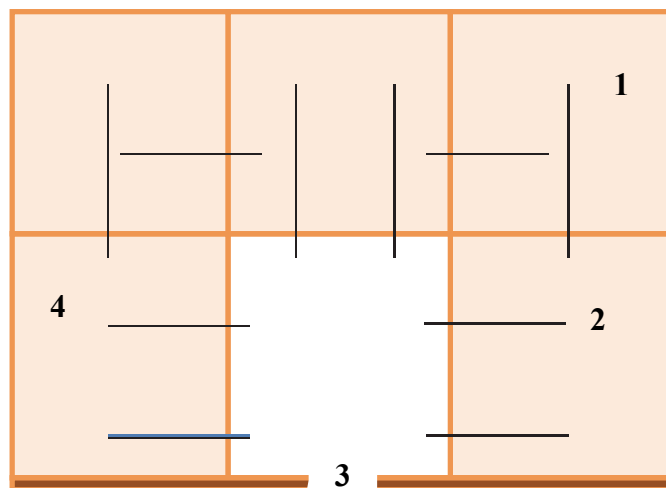


Рис. 3. Конструкция искусственной потолочины без армирования:
1 – вертикально расположенные анкеры; 2 – горизонтально расположенные анкеры;
3 – породная подушка; 4 – заложённая очистная выработка

[Figure 3. Construction of an artificial ceiling without reinforcement:
1 – vertically arranged anchors; 2 – horizontal anchors; 3 – pedal pillow; 4 – pledged clearing generation]

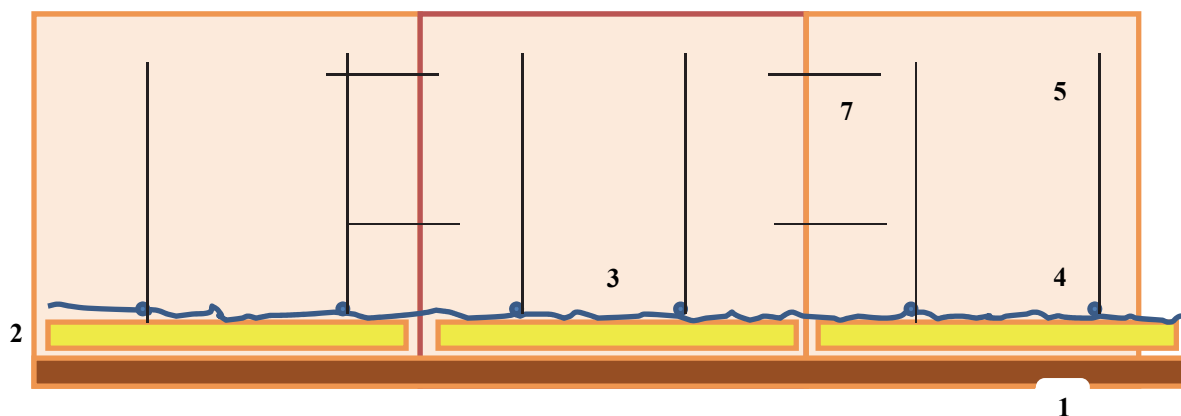


Рис. 4. Искусственная потолочина с несущей арматурой:
1 – породная подушка; 2 – лежень; 3 – сетка; 4 – горизонтальные анкеры; 5 – вертикальные анкеры; 7 – железобетонные анкеры

[Figure 4. Artificial ceiling with supporting fittings:
1 – rock pillow; 2 – bed; 3 – grid; 4 – horizontal anchors; 5 – vertical anchors; 7 – reinforced anchors]

При варианте подачи твердеющих смесей на отбитую руду конструкция создается секциями длиной до 12 м. Сначала подается порция закладки с повышенным содержанием цемента (300 кг/км^3) и минимальным количеством воды для образования на поверхности замагзинированной руды цементной корки, препятствующей проникновению цементного раствора в руду. Затем в потолочину ук-

ладывается основной объем твердеющей смеси. Работы под искусственной потолочиной начинают после набора бетоном прочности 6,0 МПа.

Безопасность труда и качество добываемых руд улучшают путем разделения рудных и породных потоков. Первая попытка подэтажного обрушения с применением перекрытия из крепежного леса не нашла широкого применения (рис. 5).

На рудниках второй половины прошлого века использовали перекрытия с различными несущими элементами из изношенных автомобильных

покрышек (Хромтау, Казахстан), деревянных «чуряков», тросов и металлических лент (Шантобе, Казахстан) (рис. 6).



Рис. 5. Добыча с обрушением под деревянным перекрытием
[Figure 5. Mining with caving under hardwood floor]

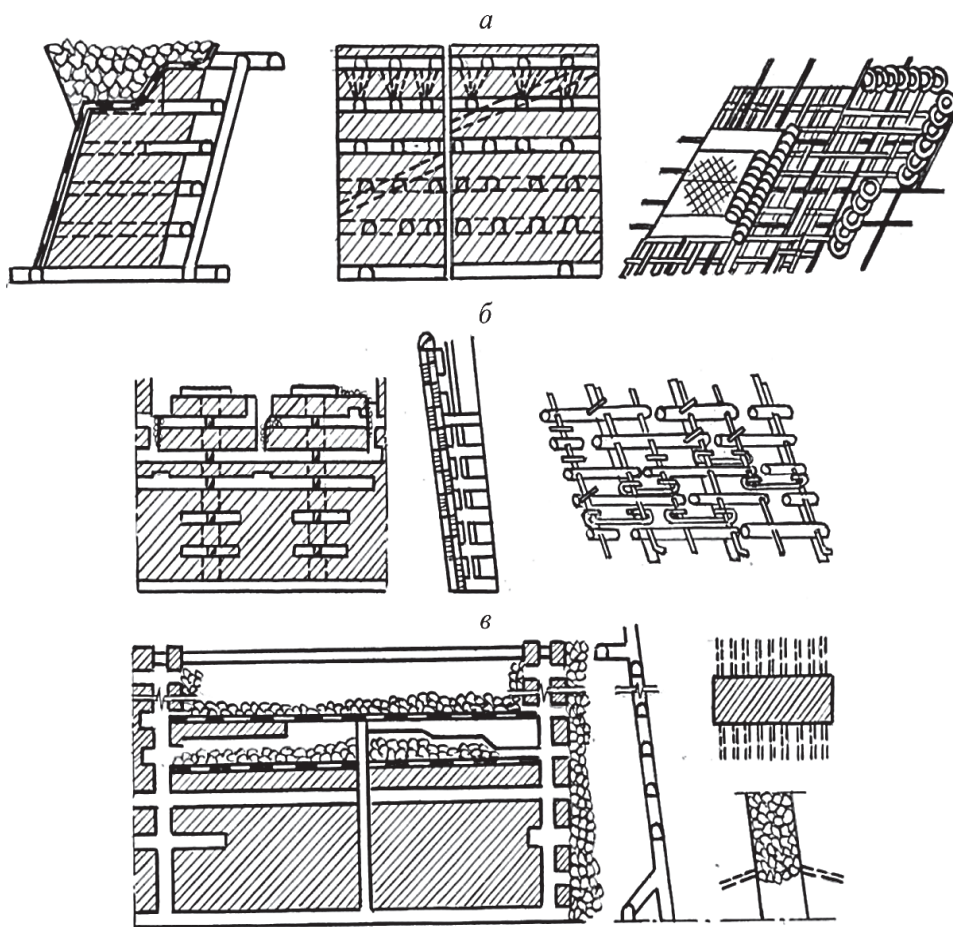


Рис. 6. Конструкции перекрытий:
а – канатно-металлическая; б – дерево-канатная; в – вантовая
[Figure 6. The structure of the floor:
а – cable-metal; б – tree-rope; в – cable stayed]

Типизация конструкций с использованием остаточной прочности
[Table 2. Typification of structures with the use of residual strength]

Вид конструкции [Type of construction]	Механизм работы [Work mechanism]	Условия применения [Terms of use]
Породная сферическая [Breed spherical]	Заклинивание пород по контуру свода после обрушения [Jamming of rocks along the contour of the arch after the collapse]	Породы средней прочности, руды средней ценности [Medium strength rocks, ore of average value]
Породная плоская [Breed flat]	Заклинивание пород в нижнем слое без обрушения [Jamming of rocks in the lower layer without collapse]	Прочные породы, ценные руды [Durable rocks, valuable ores]
Породно-бетонная [Breed-concrete]	Упрочнение пород бетонными элементами [Hardening rocks with concrete elements]	Породы любой прочности, ценные руды [Breeds of any strength, valuable ores]
Бетонная [Concrete]	Удержание полной массы столба налегающих пород [The retention of the full mass of the column overlapping rocks]	
Бетонная армированная [Reinforced concrete]		
Деревянная [Wooden]	Временное поддержание пород [Temporary rock maintenance]	Прочные и среднепрочные породы, локальные участки [Strong and medium-hard rocks, local areas]
Канатно-металлическая [Cable-metal]	Удержание полной массы столба налегающих пород [The retention of the full mass of the column overlapping rocks]	Породы любой прочности, достаточная несущая способность канатов [Breeds of any strength, sufficient bearing capacity of the ropes]
Дерево-канатная [Tree-rope]		
Вантовая [Guyed]		
Цементированно-породная [Cemented rock]	Создание экрана для разделения руд и пород [Creating a screen to separate ores and rocks]	Породы любой прочности, оперативное регулирование напряжений [Breeds of any strength, prompt stress control]

Опыт применения комбинированных перекрытий на основе технологически разрушенных пород накоплен на рудниках добывающей подотрасли атомной энергетики при разработке месторождений Восток, Маньбайское, Заозерное, Молодежное, Звездное, Ишимское, Центральное, Шокпак, Камышовое и других Целинного горно-химического комбината.

Повышение качества добываемых руд может быть оценено величиной снижения разубоживания руд породами в пределах 15–20 %.

Так, на месторождениях Ишимское, Центральное, Заозерное использование феномена самозаклинивания структурных породных блоков позволило отработать запасы объемами более 1 млн м³ без обрушения земной поверхности.

На месторождении Восток в промышленных масштабах использовали несущие и разделяющие конструкции дерево-канатных и канатно-металлических перекрытий. На месторождении Заозерное для отработки крутопадающих маломощных рудных тел широко применялись вантовые перекрытия. При отработке мощных рудных тел с закладкой пустот твердеющими смесями практи-

ковались конструкции из разнопрочных составов твердеющих смесей, в том числе на основе утилизируемых отходов собственного и смежных производств.

От полноты оценки и учета феномена сохранения остаточной несущей способности разрушенных пород зависят как безопасность работающих, так и состояние техносферы в районе горных работ [13–14].

Выводы

Эффективность подземной разработки рудных месторождений определяется возможностью сохранения плоской формы кровли очистных выработок путем обеспечения геомеханической сбалансированности участков рудовмещающих породных массивов.

При разрушении массива горными работами породы сохраняют остаточную несущую способность, что может быть использовано для решения геомеханических задач. Реализация этого феномена при создании породных конструкций с заданными свойствами способствует решению задач охраны труда и повышения качества руд. Задачи

горного производства решаются с привлечением методов строительной механики инженерных конструкций и сооружений.

Минимизация затрат на управление состоянием массива, повышение качества руд и безопасности работ обеспечиваются неперевышением безопасных по уровню напряжений эквивалентных пролетов обнажения пород по предлагаемой методике.

Благодарности

В статье представлены результаты исследований, выполненных по программе Erasmus+ 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP “Modernization of geological education in Russian and Vietnamese universities”.

Список литературы

1. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И. Несущие породные конструкции при освоении подземных объектов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 2. С. 48–57.

2. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Ляшенко В.И. Прочность породных конструкций при подземном строительстве // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 4. С. 57–65.

3. Haeri H., Shahriar K., Fatehi Marji M., Moarefvand P. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. Vol. 67. Pp. 20–28.

4. Куранов А.Д., Сидоров Д.В. Оценка напряженного состояния междустректовых целиков на рудниках ОАО «Апатит» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2011. № 1. С. 308–312.

5. Ляшенко В.И. Развитие геомеханического мониторинга свойств и состояния массива горных пород при подземной разработке месторождений сложной структуры // Маркшейдерский вестник. 2016. № 1. С. 35–43.

6. Протосеня А.Г., Куранов А.Д. Методика прогнозирования напряженно-деформированного состояния горного массива при комбинированной разработке Ко-

ашвинского месторождения // Горный журнал. 2015. № 1. С. 67–71.

7. Рьльникова М.В., Емельяненко Е.А., Ангелов Н.А. Формирование техногенного массива из хвостов обогащения в отработанном пространстве с заданными структурными параметрами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 1. С. 115.

8. Shojaei A., Dahi Taleghani A., Li G. A continuum damage failure model for hydraulic fracturing of porous rocks // International Journal of Plasticity. 2014. Vol. 59. Pp. 199–212.

9. Плешко М., Месхи Б., Плешко М. Новый метод расчета объединенной анкер-бетонной опоры подземных сооружений // МАТЕС Web of Conferences. 2018. Т. 170. 03023. doi.org/10.1051/mateconf/201817003023.

10. Yunjin H., Guolong C., Weiping C., Zhenjun Y. Simulation of hydraulic fracturing in rock mass using a smeared crack model // Computers and Structures. 2014. Vol. 137. Pp. 72–77.

11. Молев М.Д., Масленников С.А., Занина И.А., Стуженко Н.И. Прогнозирование состояния техносферной безопасности: монография. Шахты: ИСОиП (филиал) ДГТУ, 2015. 113 с.

12. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Кожиев Х.Х. Минимизация влияния горного производства на окружающую среду // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 6. С. 26–29.

13. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комащенко В.И., Разоренов Ю.И. Экологические аспекты хранения хвостов обогащения руд в горном регионе // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 6. С. 35–39.

14. Стась Г.В., Смирнова Е.В. Травматизм и профессиональные заболевания на горных предприятиях // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. Вып. 1. С. 30–42.

Для цитирования

Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Разоренов Ю.И. Использование остаточной прочности пород в несущих конструкциях при подземной добыче руд // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 193–203. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-193-203>

Use of residual rock strength in bearing structures in underground ore mining

Vladimir I. Golik

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
93a Markova St., Vladikavkaz, 362002, Russian Federation
North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44 Nikolaeva St., Vladikavkaz, 362021, Russian Federation

Yury V. Dmitrak, Oleg Z. Gabaraev

North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
44 Nikolaeva St., Vladikavkaz, 362021, Russian Federation

Yuri I. Razorenov

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132 Prosveshcheniya St., Novochoerkassk, 346428, Russian Federation

Article history:

Received: March 11, 2019

Revised: May 06, 2019

Accepted: May 21, 2019

Keywords:

massif; stresses; strength; rock; underground mining; quality; safety

The relevance of the study is explained by the need to improve technological processes with the increasing complexity of the development of ore deposits with an increase in the depth of development, the use of powerful technology and an increase in stresses in arrays of ore-bearing rocks. The need to minimize the risk of mining requires the development and use of tools for managing an array. The purpose of this study is to systematize information about the theory and practice of using the residual bearing capacity of destroyed rocks from the practice of underground mining to improve the methods used to control the geomechanics of ore-bearing arrays. The complex of research includes analytical, full-scale, laboratory and theoretical methods that are used to identify the phenomenon of the use of the residual carrying capacity of destroyed rocks. To achieve this goal information on the use of bearing floors made of intact and destroyed ores and rocks, as well as other materials, is systematized. A brief description of the scientific support of mining engineering tasks is given. The phenomenon of the use of residual bearing capacity of disturbed rocks in the structure arising in the mountain massif is characterized. A critical analysis of the concepts of array management is given. Considered alternative options for creating structures for solving problems of reducing the health risk of workers and improving the quality of ores. A new typification of structures using the residual strength of destroyed rocks is given. It has been proved that in underground mining there is an opportunity to realize the residual bearing capacity of the destroyed rocks to create structures with desired properties, which contributes to solving the tasks of labor protection and improving the quality of ores.

Acknowledgements

The article presents the results of research carried out under the Erasmus program + 574061-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP “Modernization of geological education in Russian and Vietnamese universities”.

References

1. Golik VI, Razorenov YuI, Lyashenko VI. Nesushchie porodnye konstrukcii pri osvoenii podzemnykh ob'ektov [Bearing rock structures in the development of

underground objects]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;(2): 48–57. (In Russ.)

2. Golik VI, Razorenov YuI, Lyashenko VI. Prochnost' porodnykh konstrukcij pri podzemnom stroitel'stve [The strength of rock structures in underground construction.] *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;(4): 57–65. (In Russ.)

3. Haeri H, Shahriar K, Fatehi Marji M, Moarefvand P. Experimental and pre-cracked rock-like disks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;67: 20–28.

4. Kuranov AD, Sidorov DV. Ocenka napryazhenogo sostoyaniya mezhdushtrekovykh celikov na rudnikah OAO “Apatit” [Evaluation of the tense state of the inter-track pillars in the mines of OJSC “Apatit”]. *News of Tula State University. Earth Sciences*. 2011;(1): 308–312.

5. Lyashenko VI. Razvitie geomekhanicheskogo monitoringa svoystv i sostoyaniya massiva gornyh porod pri

Vladimir I. Golik – chief researcher at the GPI VSC RAS; Professor of Department of Mining of North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Doctor of Technical Sciences, Professor; v.i.golik@mail.ru
Yury V. Dmitrak – Rector of the North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Doctor of Technical Sciences, Professor,
Oleg Z. Gabaraev – Head of Department of Mining of North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Doctor of Technical Sciences, Professor.
Yuri I. Razorenov – rector in charge of SRSPU (NPI), Doctor of Engineering Sciences, Professor.

podzemnoj razrabotke mestorozhdenij slozhnoj struktury [Development of geomechanical monitoring of the properties and state of the rock mass during underground mining of complex structures]. *Marksheydersky Bulletin*. 2016;(1): 35–43. (In Russ.)

6. Protosenya AG, Kuranov AD. Metodika prognozirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornogo massiva pri kombinirovannoj razrabotke Koashvinskogo mestorozhdeniya [Method of forecasting the stress-strain state of a mountain massif with the combined development of the Koashvinskoe deposit]. *Gornyi zhurnal*. 2015;(1): 67–71. (In Russ.)

7. Rylnikova MV, Emelyanenko EA, Angelov NA. Formirovanie tekhnogenno massiva iz hvostov obogashcheniya v otrabotannom prostranstve s zadannymi strukturnymi parametrami [Formation of a technogenic massif from enrichment tails in a spent space with given structural parameters]. *Mining informational and analytical bulletin*. 2013;(1): 115. (In Russ.)

8. Shojaei A, Dahi Taleghani A, Li G. A continuum damage failure model for hydraulic fracturing of porous rocks. *International Journal of Plasticity*. 2014;59: 199–212.

9. Pleshko M, Meskhi B, Pleshko M. Novyj metod rascheta ob"edinennoj anker-betonnoj opory podzemnyh sooruzhenij [New method for calculating the combined anchor-concrete support of underground structures]. *MATEC Web of Conferences*. 2018;170: 03023. Available from: doi.org/10.1051/mateconf/201817003023. (In Russ.)

10. Yunjin H, Guolong C, Weiping C, Zhenjun Y. Simulation of hydraulic fracturing in rock mass using

a smeared crack model. *Computers and Structures*. 2014; 137: 72–77.

11. Molev MD, Maslennikov SA, Zanina IA, Stuzhenko NI. *Prognozirovanie sostoyaniya tekhnosfernoj bezopasnosti: monografiya* [Forecasting the state of technosphere safety: monograph]. Shakhty: ISOiP (branch) DGTU; 2015. (In Russ.)

12. Golik VI, Dmitrak YuV, Gabaraev OZ, Kozhiev KhH. Minimizaciya vliyaniya gornogo proizvodstva na okruzhayushchuyu sredu [Minimizing the impact of mining on the environment]. *Ecology and Industry of Russia*. 2018;22(6): 26–29. (In Russ.)

13. Golik VI, Dmitrak YuV, Komashchenko VI, Razorenov YuI. Ekologicheskie aspekty hraneniya hvostov obogashcheniya rud v gornom regione [Ecological aspects of storage of ore dressing tailings in a mountainous region]. *Ecology and industry of Russia*. 2018;22(6): 35–39. (In Russ.)

14. Stas GV, Smirnova EV. Travmatizm i professional'nye zabolevaniya na gornyh predpriyatiya [Traumatism and occupational diseases in mining enterprises]. *News of Tula State University. Series: Earth Sciences*. 2015;(1): 30–42. (In Russ.)

For citation

Golik VI, Dmitrak YuV, Gabaraev OZ, Razorenov YuI. Use of residual rock strength in bearing structures in underground ore mining. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 193–203. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-193-203>. (In Russ.)

