

0+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC, TECHNOLOGICAL AND PRODUCTION JOURNAL

МАРКШЕЙДЕРИЯ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Т. 25, №3 Май–Июнь 2025 г.

Vol. 25, №3 May-June 2025

MINE SURVEYING AND SUBSURFACE USE

www.n-gn.ru



РУТНАЧАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА,
ТЕПЛОФИЗИКА
MINE AEROGAS DYNAMICS,
MINING THERMOPHYSICS

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ
SURVEYING AND GEOLOGICAL
SUPPORT FOR MINING WORKS

ГЕОМЕХАНИКА,
РАЗРУШЕНИЕ
ГОРНЫХ ПОРОД
GEOMECHANICS, ROCK DESTRUCTION

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ,
ГОРНЫЕ МАШИНЫ
GEOTECHNOLOGY, MINING MACHINES

ОБОГАЩЕНИЕ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ
MINERAL PROCESSING
SURVEYING AND GEOLOGICAL SUPPORT FOR MINING WORKS

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ
РЕСУРСЫ
MINERAL RESOURCES

Масштабное событие горной отрасли в России

Рудник

официальная поддержка:



Минпромторг
России



Торгово-промышленная
палата Российской Федерации



Правительство
Свердловской области



НП «Горнопромышленники
России»

22–24 октября 2025
Екатеринбург

**10-я международная выставка современных
технологий, оборудования и спецтехники
для горнодобывающей промышленности**

принять участие



посетить



МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО»
ЭКСПО-бульвар, дом 2
(342) 206-44-80

mine.proexpo.ru



**pro
ЭХРО**

0+



ISSN 2079–3332
e-ISSN 3034–6835

Научно-технический и производственный журнал



Т. 25, №3
Май-Июнь 2025 г.

Журнал издается с 2001 года



УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА
Общество с ограниченной
ответственностью «Издательский дом
«Недропользование и горные науки»

РЕДАКЦИЯ:

Заместитель главного редактора **В. Н. Хетагуров**
Ведущий редактор **Н. А. Федотенко**
Ученый секретарь **Н. А. Милетенко**
Помощник главного редактора **Б. Н. Пашичев**

АДРЕС РЕДАКЦИИ И ИЗДАТЕЛЯ:
117647, ул. Академика Капицы, д. 26, 1.
Тел.: +7(915) 111 0386

E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru http://www.n-gn.ru
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций. Регистрационный номер ПИ № ФС 77-83630
от 26.07.2022 г.

По решению ВАК журнал включен в Перечень ведущих
рецензируемых научных журналов и изданий, в которых
могут быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой степени кандидата и
доктора наук по разработке месторождений полезных
ископаемых и по наукам о Земле

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных
ВИНИТИ и в Российский индекс научного цитирования.
Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной
справочной системе по периодическим и продолжающимся
изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Подписной индекс издания в каталоге «Урал-Пресс»,
в объединенном каталоге АРЗИ «Пресса России» – **88016**

В течение года можно произвести подписку на журнал
непосредственно в редакции

За точность приведенных сведений
и содержание данных, не подлежащих открытой публикации,
несут ответственность авторы

При перепечатке ссылка на журнал
«Маркшейдерия и недропользование» обязательна

Журнал отпечатан в типографии ООО «Клуб печати»
127018, Москва, 3-ий проезд Марьиной Рощи, д. 40, стр. 1
тел.: +7(929)982-72-82

Тираж 1000 экз.
Свободная цена.

Дата выхода в свет: 13.07.2025

ISSN 2079-3332



24 003



© ООО «Издательский дом «Недропользование
и горные науки», 2025

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ю. В. Дмитрак – д.т.н., проф., зав. отделом «Моделирование и управление горнотехническими системами», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. А. Барях – академик РАН, д.т.н., проф., руководитель научного направления «Горные науки» центра, ФИЦ Уро РАН, г. Пермь, РФ

В. И. Голик – д.т.н., проф., проф. кафедры «Горное дело», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», г. Владикавказ, РФ

В. А. Гордеев – д.т.н., проф., кафедра «Кадастр и Геоинженерия» Кубанского государственного технологического университета, Член центрального Совета Союза маркшейдеров России», г. Краснодар, РФ

В. В. Грицков – вице-президент ООО «Союз маркшейдеров России», г. Москва, РФ

В. Н. Захаров – академик РАН, д.т.н., проф., директор, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Д. Р. Каплунов – член-корр. РАН, д.т.н., проф., научный руководитель отдела «Теория проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ
Н. М. Качурин – д.т.н., проф., зав. кафедрой «Геотехнологии и строительство подземных сооружений», ТулГУ, г. Тула, РФ

Р. В. Ключев – д.т.н., проф., зав. кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)», г. Владикавказ, РФ

Н. В. Милетенко – д.г.-м.н., проф., ученый секретарь Научно-технического совета, Минприроды РФ, г. Москва, РФ

И. А. Пыталев – д.т.н., проф., директор Института горного дела и транспорта, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, РФ

К. Н. Трубецкой – академик РАН, д.т.н., проф., советник президиума РАН, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

М. А. Тюленев – к.т.н., доц., зав. кафедрой «Открытые горные работы», КузГТУ, г. Кемерово, РФ

В. А. Чантурия – академик РАН, д.т.н., проф., научный руководитель отдела «Проблемы комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДКОЛЛЕГИЯ

С. Б. Вуйич – проф., доктор наук, действительный член Академии инженерных наук Сербии, г. Белград, Сербия

И. Гобани – д.т.н., проф. химии материалов и биогидрометаллургии, Факультет естественных наук, Колледж здравоохранения и естественных наук, Линкольнский университет, Великобритания

К. Дребенштедт – проф., доктор наук, кафедра «Открытые горные работы», Технический университет Горной академии Фрайберга, Германия

Ю. Д. Каплунов – проф., д.физ.-мат.н., Школа компьютерных наук и математики, Кильский университет, г. Ньюкасл-андер-Лайм, Великобритания

А. А. Осокин – доктор наук, Инженер-геотехник, рудник «Золотая роща», 29Metals, Западная Австралия

Н. Б. Рыспанов – д.т.н., Президент Национальной Академии Горных Наук Казахстана, Президент Горнопромышленного союза Казахстана, Казахстан

Л. Хуанг – проф., доктор наук, Китайский университет горного дела и технологий, Председатель Международного общества маркшейдеров, Китай

В. Т. Хунг – проф., доктор наук, строительный факультет, кафедра «Подземного и шахтного строительства», Ханойский горно-геологический университет, Вьетнам

М. Цехлар – д.т.н., проф., декан, факультет горного дела, экологии, управления технологическими процессами и геотехнологий, Технический университет Кошице, Словакия

И. К. Чунуев – к.т.н., Президент Кыргызской горной ассоциации и маркшейдерии, член Правления Евразийского Общества Экспертов Недропользователей, КГТУ им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

Б. Эрбаш – проф., доктор наук, кафедра математики, Эскишехирский технический университет, Турция

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

И. И. Айнбиндер – д.т.н., проф., г.н.с., отдел «Теория проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

А. А. Добрынин – к.т.н., в.н.с., отдел «Проблемы геомеханики и разрушения горных пород», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Г. В. Калабин – д.т.н., проф., г.н.с., отдел «Горная экология», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

С. Б. Кулибаба – д.т.н., проф., в.н.с., лаборатория «Многофазных процессов в массивах горных пород при разработке месторождений», ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

Ф. К. Низаметдинов – д.т.н., проф., зав. кафедрой «Маркшейдерское дело и геодезия», КарТУ имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, Республика Казахстан

М. Б. Носырев – д.т.н., проф., кафедра «Информатики», Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, РФ

В. Н. Одинцев – д.т.н., в.н.с., центр проблем метана и газодинамических явлений угольных и рудных месторождений, ИПКОН РАН, г. Москва, РФ

А. А. Хорешок – д.т.н., проф., научный руководитель Горного института, КузГТУ, г. Кемерово, РФ

Ю. Ян – доц., Школа наук об окружающей среде и пространственной информатики, Китайский горно-технологический университет, г. Сюйчжоу, Китай

ISSN 2079–3332
e-ISSN 3034–6835

Scientific, Technological and Production Journal



Vol. 25, №3
May-June 2025

journal has been published since 2001



FOUNDER OF THE JOURNAL
**PUBLISHING HOUSE MINERALS
MANAGEMENT AND MINING SCIENCES,**
LIMITED LIABILITY COMPANY

EDITORIAL OFFICE:

Deputy Editor-in-Chief **V. N. Khetagurov**
Lead Editor **N. A. Fedotenko**
Scientific secretary **N. A. Miletenko**
Assistant Editor-in-Chief **B. N. Pashichev**

ADDRESS OF THE EDITORIAL OFFICE AND PUBLISHER:

117647, Akademika Kapitsa st., 26, 1.
Phone: +7(915) 111 0386
E-mail: office@n-gn.ru, articles@n-gn.ru
http://www.n-gn.ru

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.
Registration certificate PI No. FS 77-83630 dated
July 26, 2022

By decision of the Higher Attestation Commission, the journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications in which the main scientific results can be published dissertations for the degree of candidate and doctor of science in the development mineral deposits and geosciences

The journal is included in the Abstract Journal and Databases of VINITI and in the Russian science citation index Information about the journal is published annually in the international reference system in the periodicals and continuing editions of Ulrich's Periodicals Directory

Subscription index of the publication in the Ural-Press catalog, in the unified catalog ARZI «Press of Russia» – **88016**

During the year, you can subscribe to the journal directly in the editorial office

For the accuracy of the information provided and the content of data not subject to open publications are the responsibility of the authors

When reprinting a link to the journal
«Mine Surveying and Subsurface Use» required
Printed by LLC «Printing Club»

127018, Moscow
phone: +7(929)982-72-82
Covering - 1000 copies.
Free price.
Release date: 13.07.2025

ISSN 2079-3332



24 003



© Publishing House Minerals Management and Mining Sciences, LLC, 2025

EDITOR-IN-CHIEF

Yuri V. Dmitrak - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Modeling and Management Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Alexander A. Baryakh - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the scientific direction Mining Sciences of the center, Mining Institute, Ural Branch, RAS, Perm, Russian Federation

Vladimir I. Golik - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Professor of the Mining Department, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Victor A. Gordeev - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Cadastre and Geoengineering of Kuban State Technological University, Member of the Central Council of the Union of Surveyors of Russia, Krasnodar, Russian Federation

Victor V. Gritskov - Vice-President of the Union of Surveyors of Russia, Moscow, Russian Federation
Valery N. Zakharov - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

David R. Kaplunov - Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Department of Design Theory and Geotechnology of Integrated Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Nikolay M. Kachurin - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Geotechnologies and Construction of Underground Structures, Tula State University, Tula, Russian Federation

Roman V. Klyuev - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Department Power Supply of Industrial Enterprises, North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russian Federation

Nikolay V. Miletenko - Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Prof., Scientific Secretary of the Scientific and Technical Council, Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

Ivan A. Pytalev - Dr. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Mining and Transport, Nosov Marnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Kliment N. Trubetskoy - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Advisor to the Presidium of the RAS, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation
Maxim A. Tylenov - Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Open-pit Mining, T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Valentin A. Chanturia - Academician of the RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Department of Problems of complex extraction of mineral components from natural and man-made raw materials, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

Slobodan B. Vujčić - Professor, Dr. Sci., Full member of the Academy of Engineering Sciences of Serbia, Belgrade, Serbia

Yousef Ghorbani - Ph.D., Professor in Materials Chemistry and Bio-Hydrometallurgy, School of Natural Science, College of Health and Science, University of Lincoln, United Kingdom

Carsten Drebenstedt - Professor, Dr. Sci., Chair Surface Mining, Technical University Mining Academy Freiberg, Germany

Julius D. Kaplunov - Professor, Dr. Sci. in Theoretical Solid Mechanics, School of Computer Science and Mathematics, Keele University, United Kingdom

Alexander A. Osokin - Dr. Sci., Geotechnical Engineer, Golden Grove, Operations Pty Ltd, 29Metals, Western Australia

Nurlan B. Ryspanov - Dr. Sci. (Eng.), President of the National Academy of Mining Sciences of Kazakhstan, President of the Kazakhstan Mining Union, Kazakhstan

Leting Huang - Professor, Dr. Sci., China University of Mining and Technology, Chair of the International Society for Mine Surveying, China

Vo Trong Hung - Professor, Dr. Sci., Faculty for Construction, Department for Underground and Mines Construction, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

Michal Cehlar - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Dean, Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnologies, Technical University of Kosice, Slovakia

Ishimbay K. Chunuev - PhD in Technical Sciences, President of the Kyrgyz Mining Association and Surveying, Member of the Board of the Eurasian Society of Experts of Subsoil Users, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyzstan

Baris Erbas - Professor, Dr. Sci., Department of Mathematics, Eskisehir Technical University, Turkey

EDITORIAL COUNCIL

Igor I. Ainbinder - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Design Theory and Geotechnology of Integrated Subsoil Development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Alexander A. Dobrynin - Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Department of Geomechanics and Rock Destruction, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Gennady V. Kalabin - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Mountain Ecology, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Sergey B. Kulibaba - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Leading Researcher Laboratory of Multiphase processes in rock formations during field development, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Farit K. Nizametdinov - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Surveying and Geodesy, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Mikhail B. Nosyrev - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Computer Science, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

Vladimir N. Odintsev - Dr. Sci. (Eng.), Leading researcher at the Center for Problems of Methane and Gas Dynamic Phenomena of Coal and Ore Deposits, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources RAS, Moscow, Russian Federation

Alexey A. Khoreshok - Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Director of the Mining Institute, T.F. Gorbachev State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Yongjun Yang - Ass. Professor, School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, China

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ИНТЕРВЬЮ

Интервью с Заслуженным геологом Республики
Казахстан
М. Ж. Битимбаевым

6 Interview with Honored Geologist of the Republic of
Kazakhstan
M. Zh. Bitimbayev

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

85 лет – Алексею Владимировичу Гальянову

9 85 years – Alexey Vladimirovich Galyanov

МАРКШЕЙДЕРСКОЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ

SURVEYING AND GEOLOGICAL SUPPORT FOR MINING WORKS

И. М. Величко

I. M. Velichko

Сравнение лазерного сканирования и радарной
интерферометрии при наблюдении за движениями
земной поверхности на открытых горных работах

10 Comparison of laser scanning and radar interferometry in
observing the movements of the earth's surface in open-pit
mining

Ф. М. Голубев, В. П. Сажнев

F. M. Golubev, V. P. Sazhnev

Оптимизация формирования трехмерных моделей
объектов поверхности с использованием наземного
лазерного сканера

16 Optimization of the formation of three-dimensional
models of surface objects using a terrestrial laser scanner

Б. Н. Бухтояров, О. Р. Старикова

B. N. Bukhtoyarov, O. R. Starikova

Маркшейдерский контроль пространственного
положения скважин

21 Surveyor control of spatial position of wells

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА, ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

MINE AEROGAS DYNAMICS, MINING THERMOPHYSICS

А. Н. Домрачев, М. Г. Коряга

A. N. Domrachev, M. G. Koryaga

К вопросу о методологии моделирования и оценки
конструкции быстровозводимых взрывоустойчивых
перемычек

29 To the question on methodology of modeling and
evaluation of the design of rapidly erectable explosion-
proof stoppings

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА, ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

GEOLOGY, EXPLORATION, EXPLOITATION OF OIL AND GAS FIELDS

*В. Н. Сокотущенко, Е. А. Евстафеев,
Х. А. А. С. Аль-Кадри*

V. N. Sokotuschenko, E. A. Evstafeev, K. A. A. S. Al-Qadi

Обоснование рациональной депрессии на пласт
обводненных газовых скважин с целью повышения
газоотдачи месторождения на поздней стадии
разработки

36 Justification for the rational depression on the reservoir of
watered gas wells to enhance gas recovery of the field at
the late stage of development

ГЕОМЕХАНИКА, РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

GEOMECHANICS, ROCK DESTRUCTION

Б. В. Хохлов, М. Д. Рожко

B. V. Khokhlov, M. D. Rozhko

Исследование влияния очистных работ на
дегазационную скважину в обводненном массиве

42 Investigation of the impact second mining operations on a
borehole drilled in a saturated with water rock mass

С. П. Бахаева, Е. А. Коновалова

S. P. Bakhaeva, E. A. Konovalova

Управление устойчивостью отвала полусухих хвостов

53 Semi-dry tailings dump stability management

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

MINERAL PROCESSING

В. А. Иодис

V. A. Iodis

Активация, регенерация и переработка отработанных
катализаторов с использованием ультразвукового
воздействия

61 Activation, regeneration and recycling of spent catalyst
using ultrasonic impact

МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫЕ РЕСУРСЫ

А. А. Басаргин

Применение методов геостатистического анализа
для оценки ресурсного потенциала золоторудного
месторождения

66

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ, ГОРНЫЕ МАШИНЫ

*Г. М. Дубов, М. Ю. Яцевич,
Д. А. Бороненков, Д. М. Якобсон*

Опыт использования сжиженного природного газа
как газомоторного топлива на технологическом
транспорте

73

MINERAL RESOURCES

A. A. Basargin

Application of geostatistical analysis methods for
assessment of the resource potential of a gold ore deposit

GEOTECHNOLOGY, MINING MACHINES

*G. M. Dubov, M. Y. Yatsevich,
D. A. Boronenkov, D. M. Yakobson*

Experience in the use of liquefied natural gas as a gas
motor fuel in technological transport

ДОРОГИЕ КОЛЛЕГИ!



В 2025 году мы отмечаем 80-летие нашей Победы в Великой Отечественной войне. По всему миру в течение всего года проходят мероприятия, посвященные празднованию этой памятной даты, такой важной и значимой для всего прогрессивного человечества. Коллектив и редакция журнала «Маркшейдерия и недропользование» от всей души поздравляют вас с 80-летним юбилеем нашей Победы в Великой Отечественной войне. Мы с огромной благодарностью вспоминаем тех, кто сражался за нашу свободу и независимость, кто не жалел своей жизни ради будущих поколений. Подвиг ветеранов бессмертен, сила их духа и мужества – пример для нас всех. Желаем вам, чтобы каждый день приносил лишь хорошие вести, а над головой было мирное небо! Мы все с вами – потомки славных победителей, защитивших Родину в годы Великой Отечественной войны, и поэтому обязаны хранить память о наших героях и помнить слова нашего выдающегося ученого Михаила Васильевича Ломоносова: «Народ, не знающий своего прошлого, не имеет будущего».

Низкий поклон вам, дорогие наши ветераны, вечная память всем павшим в боях во время Великой Отечественной войны, слава труженикам тыла, обеспечившим силу нашей Победы!

В этой связи необходимо отметить, что горнодобывающая промышленность сыграла критически важную роль в победе Советского Союза в Великой Отечественной войне. Обеспечение фронта необходимыми ресурсами, такими как металлы, топливо и другие полезные ископаемые, было жизненно важным для производства военной техники, вооружения и боеприпасов, поэтому также с благодарностью мы вспоминаем тружеников горнодобывающей отрасли, ковавших нашу Победу в тылу!

В честь памяти всех защитников нашей Родины, подаривших нам Победную весну 9 мая 1945 года, мы разместили в этом номере стихотворение. Оно – об учителе начальных классов, который работал в маленьком шахтерском поселке Донецкой области и учил нас, детей шахтеров, любить свою Родину и поэзию.

От коллектива и редакции журнала
ученый секретарь, канд. техн. наук
Наталья МИЛЕТЕНКО

Посвящается Михаилу Ивановичу Дармину, моему дорогому учителю начальных классов средней школы № 11 пос. Зуевска г. Харьцызска Донецкой обл., принимавшему участие в освобождении Белоруссии, Украины, Польши, штурме Берлина и Рейхстага

*Он был учителем начальных классов,
Учил добру, во всем был человек.
Немногословный, мудрый и достойный,
В манерах и поступках безупречен.*

*Он нас усердию учил и созиданью,
Любить родную речь, родную землю.
Был строг, но справедлив, и в детском сердце
Он заронил росток, что я приемлю.*

*Росток про справедливость и заботу,
Как важно помогать во всем друг другу,
Быть сопричастным, честным и в работе,
Не поддаваться лени и испугу.*

*Он правилам учил, мы это знали,
Что правила те кровью он проверил
В полку стрелковом Бахмачевской части
И тропами военными измерил.*

*Его дороги, фронтовые раны –
Они проводниками нам всем стали
Любови к жизни, к делу, к маме, к дому,
Которые Вы жизнью отстояли.*

*В боях прошедших, страшных, незабываемых,
О коих Вы нечасто нам вещали,
Вы закалили свой характер твердый
И стали силою крепче стали.*

*И в Белоруссии, и в Польше, и в Берлине
Ваш путь артиллериста, командира
Мостом стал нам, потомкам, вашим внукам,
Дорогой к счастью, к дружбе, к делу мира.*

*Из фронтовой когорты закаленной
Героев-победителей достойных
Вы в мир шагнули, чтоб учить во благо
Садов цветенья среди степей привольных.*

*Как повезло нам, лишь теперь с годами
Мы можем оценить судьбы участие:
Он нам, ученикам, как за отца был –
Такая редкость и такое счастье!*

*Поклон Вам, мой прекраснейший учитель!
Начальных классов мой наставник добрый!
Вы детства нашего свет теплый и основа,
Как камертон, как звук согласный твердый!*

Наталья МИЛЕТЕНКО, ст. научн. сотр ИПКОН РАН, ученый секретарь журнала «МиН»,
член Союза писателей РФ, член Федерации деятелей культуры и искусства



ФУНДАМЕНТАЛЬНОСТЬ ЗНАНИЯ, ОТВЕТСТВЕННОСТЬ И ПОСТОЯННЫЙ ПОИСК ПРОРЫВНЫХ РЕШЕНИЙ – ОСНОВА ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО И ЖИЗНЕННОГО УСПЕХА

Дорогие друзья, сегодня гость нашего интервью – заслуженный геолог Республики Казахстан (2025 г.), академик Национальной инженерной академии РК и академик Международной инженерной академии, академик Академии минеральных ресурсов РК, главный научный сотрудник института геологических наук имени К. И. Сатпаева, главный редактор «Горного журнала Казахстана», доктор технических наук, профессор Марат Жакупович БИТИМБАЕВ.



– Здравствуйте, уважаемый Марат Жакупович, позвольте, пожалуйста, вас в первую очередь поздравить со столь высокой наградой – «Заслуженный геолог Республики Казахстан», которую вы получили первым в стране, и пожелать дальнейших профессиональных успехов! И в этой связи вопрос: как вы, специалист с колоссальным опытом управленца, оцениваете состояние геологической службы Казахстана и каковы перспективы ее развития?

– Приоритетность развития геологической службы определена президентом К-Ж. К. Токаевым в силу ее роли в экономическом росте и обеспечении социального благополучия народа страны, которая усиливается геологическими особенностями территории Казахстана, сулящими новые открытия конкурентоспособных месторождений полезных ископаемых.

Например, в 2024 году геологи ТОО «Центргеолсъемка» завершили поисковые работы на редкоземельные металлы в Центральном Казахстане, оценив открытый ими рудный узел «Жаңа Қазақстан» как крупнейшее в мире месторождение РЗМ.

Учитывая благоприятность факторов, влияющих на растущий инвестиционный интерес к геологоразведочным работам, геологическая служба в развитии нацелена на качественное улучшение кадрового потенциала и новые технологические решения.

– Я также знаю, что вы являетесь новатором по целому ряду научных направлений, поэтому расскажите, каковы основные принципы созидательного освоения недр, которые продвигаете для широкой международной научной аудитории?

– Созидательное освоение недр – это обобщение систем знаний и их совокупное развитие для совместной, не противоречащей друг другу реализации в природной и в созданной однажды техногенной средах технологий, действующих в условиях ресурсо-воспроизводства, ресурсосбережения и сохранения качественной природной среды.

Представляемое научное понятие – это продолжение развития в условиях реализации научно-производственных задач развития производства металлов в XXI веке, исходя из определенных трех направлений создаваемой системы знаний. Предшественником такого междисциплинарного взаимодействия было «Комплексное освоение недр», созданное академиком М. И. Агошковым и академиком Н. В. Мельниковым, которое получило практическое определение в целях сохранения качественной природной среды в трудах академика РАН К. Н. Трубецкого и члена-корреспондента РАН Д. Р. Каплунова.

– Как вы полагаете, предлагаемые вами принципы созидательного освоения – это новое знание? Или его можно считать развитием каких-то других теорий, например теории биосферы В. И. Вернадского, которая известна научному сообществу с начала прошлого века?

– Я уверен, что движение вперед в любой сфере науки и производства не может быть качественным и полезным, если мы не учитываем опыт «отцов науки». Я имею в виду в контексте вашего вопроса академика В. И. Вернадского, сказавшего одним из первых, что в какой бы степени недр ни были освоены (исчерпаны), общество не может существовать без них, то есть быть в состоянии, когда их использование ненужно или невозможно, поэтому недр как особый многообразный ресурс должны быть сохраняемы постоянно.

– Вы человек уникальной судьбы, уникального опыта, в том числе как руководитель горных предприятий Казахстана в советское время (Ачисайского и Иртышского полиметаллических комбинатов), управленец высшего ранга как заместитель министра промышленности РК (1991–1994 гг.), заместитель министра геологии и охраны недр РК (1994–1997 гг.), директор Института горного дела им. Д. А. Кунаева (1999–2000 гг. Как оцениваете сегодня состояние развития горнодобывающей отрасли республики?

– Хочется, чтобы все работающие предприятия видели перед собой светлые дали и на очереди стоял вопрос строительства новых предприятий. К этому стремится и государство в заботах о благополучии общества на долгие годы в историческом масштабе, и частный бизнес в своем стремлении сохраниться.

Я думаю, что препятствием этому общему стремлению может быть только своевременная геологическая разведка, поддерживаемая новыми геотехнологиями добычи и переработки в сопровождении роботизации и искусственного интеллекта в условиях современной инфраструктуры и наличия кадров.

Недра Казахстана еще далеко не исчерпаны. Об этом говорит повышенный интерес к ним со стороны частного капитала и интенсивное строительство новых предприятий.

– Как ученый с огромным опытом научных изысканий, скажите, какие способы добычи полезных ископаемых считаете наиболее перспективными на данный момент и в чем специфика предложенного вами способа подземного скважинного выщелачивания металлов сульфидных руд?

– Мы говорим о качественном освоении недр в формате ресурсовоспроизводства и ресурсосбережения. Это современное определение сущности недропользования, впервые высказанное как ответ на тезис академика В. В. Вернадского другим выдающимся инженером – академиком РАН К. Н. Трубецким, возможно реализовать в жизни совокупно, применяя подземное скважинное выщелачивание. Оно является самым современным способом для цветных и драгоценных металлов, позволяющим без механического воздействия с разрушением массива оруденения, без разделения запасов на балансовые и забалансовые, исключив понятие «проектные потери», добавив в производство дополнительно металлы из вмещающих пород и даже из геохимических ореолов и барьеров. Теоретически мы можем увеличить ресурсную базу против традиционной, исключив проектные потери, на 8–30 %.

Поэтому за данной технологией – будущее, которое будет основано на сохранении массива недр и поверхности, ресурсовоспроизводстве, ресурсосбережении, снижении себестоимости. При этом дополнительно есть диктуемая возможность объединить производственные процессы изъятия металлов из мест скопления в рабочий раствор и получения селективного и/или коллективного товарного продукта под землей без обогатительной фабрики и хвостохранилищ.

Мы этим занимаемся, вплотную с коллегами из других стран.

– Скажите, а в чем смысл циркулярной экономики, о которой говорите в своих научных трудах?

– Во-первых, трансформация содержания и сущности горных наук об освоении недр в науки, сохраняющие недра в управляемом режиме взаимодействия геологической среды и техногенных систем воздействия на нее, стала возможной в позитивном ключе вследствие создания научно обоснованного баланса запасов металлов, которые возможно использовать в сберегающем и воспроизводящем режиме из недр и вне недр.

Во-вторых, происхождение источников производства металлов из природной и техногенной сырьевой баз определяется материальностью, так как все предметы и явления в мире представляют собой различные состояния и свойства движущейся материи, которая характеризуется одновременно единством и многообразием. Кроме того, окружающая нас действительность существует в виде объектов, подчиняющихся всеобщему закону единства и борьбы противоположностей. В нашем случае относительно источников производства металлов противоположность проистекает из единства цели по достижению постоянной, по времени неисчерпаемой в историческом масштабе обеспеченности потребности цивилизации в металлах. Но достигаемое циркулярной экономикой состояние постоянной обеспеченности металлами за счёт двух источников их производства таит в себе и постепенно создаваемую проблему, которая должна научно обоснованно и управляемо государственно-частным партнерством решаться в обязательном порядке.

Проблема заключается в том, что вследствие налаженного снабжения экономики более дешевым металлом из фонда циркулярного возврата ранее произведенного металла первичная добыча из недр постепенно начнет уменьшаться. Но тогда с определенным отставанием по времени возврат употребленного металла из-за снижения первичной добычи тоже начнет снижаться вплоть до его обнуления. С учетом такого негативного результата взаимодействия природного и техногенного источников металлов технологические и организационные аспекты его должны иметь управляемую способность регулироваться без создания аварийных ситуаций, связанных как с отсутствием сырья, так и с его экономически неэффективным перепроизводством из одного или обоих источников.

В-третьих, исходя из этого практического действия всеобщего закона действительности, мы не должны разделять крайности (в нашем случае природную и техногенную среды, состоящие из одной и той же материи), а, напротив, осваивать целое (суммарное количество металлов) как органическую систему, в которой противоположности взаимопроникают, обуславливая весь процесс её развития. Тем самым воспроизводятся конкретная целостность и развитие нашего объекта – производства металлов. Такое освоение совместного позитивного во всех своих составляющих взаимодействия выявленных крайностей определяется созданием организационно-технического управляющего механизма многоуровневой, взаимосвязанной с требованиями рынка в первую очередь по объемам производства металлов из каждого источника.

Предварительные расчёты показывают, что экономия ресурсов из недр за счёт цикличного возврата в производство металлов в формате циркулярной экономики составит по годам от 8,7 до 38,5 %.

– Как вам удается сочетать многогранную научную работу с работой главного редактора «Горного журнала Казахстана»? Что дает вам работа главного редактора рупора горной научной и производственной мысли Республики Казахстан?

– Сочетать две работы, по-моему, приходится большинству из нас. Это несложно, когда между ними существует органическая связь, а также когда есть грамотные и воспринимающие свою работу как нужную коллеги, ну и, конечно, когда тебе нравится.

Я люблю профессию горного инженера во всех ее проявлениях. С годами любовь к родной земле и своей стране становится частью профессии, и это здорово.

– Мы беседуем в преддверии вашего юбилея, поэтому интересно узнать, решению каких научных и производственных проблем горнодобывающей отрасли планируете уделить время в ближайшей перспективе и как оцениваете тренды современных научных инновационных решений для горнодобывающей промышленности?

– Конечно, те важнейшие направления развития горных наук, о которых мы сегодня говорили (физико-технические и физико-химические геотехнологии в общем и подземное скважинное выщелачивание в частности), циркулярная экономика как новый, важнейший и техногенный источник создания искусственной сырьевой базы, теоретически неиссякаемой в историческом масштабе времени, остаются в фокусе моих интересов.

К ним в последнее время добавились желания присоединиться к команде, занимающейся роботизированными комплексами для подземных горных работ и искусственным интеллектом, в особенности оценивая его роль в управлении процессами подземного скважинного выщелачивания.

Серьезен вопрос создания в массиве недр полнообъемной искусственной проницаемости для выщелачивающего раствора. В голове есть идеи.

И вдруг ещё подумал о двух вещах:

- изъятию в качестве источника производства металлов вулканогенных горячих флюидов;
- искусственном ускорении геохимических процессов рудообразования, кратно снижающих сроки рассеяния и концентрации металлов.

Вот пока всё, и эти работы и являются «трендами», хотя я не совсем разбираюсь в русском новоязе.

– Подскажите, а что дает вдохновение в работе, каковы личные ресурсные источники, чтобы быть эффективным по столь широкому спектру направлений научной и управленческой деятельности?

– Когда-то в 7-м классе я сам себе пообещал, что буду всегда вставать в шесть утра. Я до сих пор не изменял этой привычке.

Далее – хороший дом, любимая семья во главе с супругой, с которой мы создали семью 63 года назад, друзья и родственники, коллеги, с которыми и легко, и трудно.

Классическая литература – казахская, русская, мировая история народов и религий. Все, о чем я сказал, вместе создает среду моего комфортного обитания на нашем «шарике».

– Спасибо большое за интересный разговор, желаем вам дальнейших успехов!

Беседу вела Наталья МИЛЕТЕНКО



85 ЛЕТ – АЛЕКСЕЮ ВЛАДИМИРОВИЧУ ГАЛЬЯНОВУ



4 июня 2025 года исполняется 85 лет горному инженеру, доктору технических наук, профессору, действительному члену Академии горных наук и Международной академии информатизации (Республики Казахстан) Алексею Владимировичу Гальянову. 63 года он посвятил научно-педагогической деятельности.

По окончании Свердловского горного института имени В. В. Вахрушева (ныне Уральский государственный горный университет) с 1962 по 1972 год работал в научно-исследовательском секторе института, выполняя хоздоговорную тематику кафедры маркшейдерского дела на горных предприятиях Урала, Казахстана, Сибирского региона России. По материалам проведенных работ в 1970 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Методика и применение горногеометрического анализа в условиях отработки асбестовых месторождений хризолит-асбеста», в которой, в частности, рассматривалась проблема оценки качества руды с учетом структуры поля минерализации.

В 1972–2007 годах Алексей Владимирович работал в ИГД МУМ СССР (ныне ИГД УрО РАН), где прошел путь от старшего научного сотрудника до заместителя директора института по научной работе. В 1989 году принял эстафету руководства лабораторией «Управление качеством руды» от профессора и доктора технических наук П. П. Бастана. В сложные 1990-е годы, сохранив костяк лаборатории, он придал ей новый технологический и теоретический импульс – теоретические основы рудоподготовки при добыче полезных ископаемых.

В 1996 году защитил докторскую диссертацию на тему «Технология формирования качества руды при открытой отработке месторождений», в основе которой лежит идея рассматривать технологический процесс добычи и переработки минерального сырья как динамическую систему.

С 2007 по 2023 год – профессор кафедры маркшейдерского дела УГГУ.

Под его научным руководством подготовлено четыре кандидата технических наук и два доктора технических наук.

Область научных интересов А. В. Гальянова охватывает широкий круг проблемных теоретических вопросов горных наук:

- эффективность функционирования горно-технологических систем. Сформулированы три основополагающих закона (материального баланса, технологического резерва, сбалансированности элементов системы);
- геометризацию технологических процессов как новое научное направление в горной науке;
- разработку математического алгоритма построения внутренней структуры развала горных пород под разрушающим действием скважинных зарядов;
- оценку эффективности мероприятий по стабилизации качества сырья на карьерных и специализированных складах;
- оценку сырьевой базы горных предприятий и вопросы полноты и качества извлечения запасов при добыче;
- развитие научных идей в горном деле;
- философские аспекты в науках о Земле.

А. В. Гальянов – автор 160 печатных работ, имеет 6 авторских свидетельств на изобретения. Обобщение накопленных знаний и опыта организации научных исследований нашли отражение в 20 монографиях и учебных пособиях, среди которых «10 бесед с аспирантом тет-а-тет» (2000, 2022); «Основы технологии рудоподготовки на горных предприятиях» (2000, 2022); «История горного дела: маркшейдерия, геометрия недр» (2022); «Сырьевая база промышленного комплекса чёрной металлургии России» (2022); «Понятие случайности и необходимости в осмыслении сущности бытия» (2023); «Геометрия случайного» (2025) и др. работах.

Алексей Владимирович продуктивно сотрудничает с журналом «Маркшейдерия и недропользование», более 20 лет состоял членом редакционного совета журнала.

СРАВНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЗА СДВИЖЕНИЯМИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ

И. М. Величко✉

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

✉ ivan.velichko98@gmail.com

Аннотация: Рассматриваются два метода наблюдений за деформациями земной поверхности: спутниковая радарная интерферометрия и воздушное лазерное сканирование. Данные методы наблюдения за деформациями бортов, откосов карьеров и разрезов непрерывно совершенствуются. Деформации бортов и откосов могут быть причиной появления аварий и несчастных случаев. Следовательно, возникает необходимость более подробного изучения вопроса применения радарной интерферометрии и воздушного лазерного сканирования при наблюдении за деформациями земной поверхности. Актуальность сравнительного анализа указанных методик заключается в том, что улучшение их характеристик заметно ускоряет выполнение маркшейдерских работ, повышает точность результатов измерений и снижает риски появления негативных последствий из-за деформационных процессов. Вместе с тем в работе достаточно подробно описаны основные принципы выполнения маркшейдерских измерений с помощью этих методов. Рассмотрены факторы, влияющие на повышение эффективности спутниковой радарной интерферометрии и воздушного лазерного сканирования.

Ключевые слова: открытые горные работы, лазерное сканирование, радарная интерферометрия, деформации, карьер, разрез, точность измерений

Благодарности: Автор выражает благодарность научному руководителю канд. техн. наук, доценту кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института НИТУ «МИСИС» Г. О. Абрамюну за ценные рекомендации и указания при подготовке статьи.

Для цитирования: Величко ИМ. Сравнение лазерного сканирования и радарной интерферометрии при наблюдении за сдвигами земной поверхности на открытых горных работах. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):10-15. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-10-15>.

COMPARISON OF LASER SCANNING AND RADAR INTERFEROMETRY IN OBSERVING THE MOVEMENTS OF THE EARTH'S SURFACE IN OPEN-PIT MINING

I. M. Velichko✉

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Technological University «MISIS», Moscow, Russian Federation

✉ ivan.velichko98@gmail.com

Abstract: The article discusses two methods of observing deformations of the Earth's surface – satellite radar interferometry and aerial laser scanning. These methods of monitoring deformations of sides, slopes of quarries and sections are continuously being improved. Deformations of the sides and slopes can cause accidents and accidents. Therefore, there is a need for a more detailed study of the use of radar interferometry and airborne laser scanning in observing deformations of the Earth's surface. The relevance of the comparative analysis of these techniques lies in the fact that improving their characteristics will significantly accelerate the performance of surveying work, increase the accuracy of measurement results and reduce the risks of negative consequences due to deformation processes. At the same time, the paper describes in sufficient detail the basic principles of performing surveying measurements using these methods. The factors influencing the increase in the efficiency of satellite radar interferometry and airborne laser scanning are considered.

Keywords: open-pit mining, laser scanning, radar interferometry, deformations, quarry, incision, measurement accuracy

Acknowledgments: The author expresses gratitude to his scientific supervisor, PhD, Associate Professor of the Department of Geology and Surveying at the NUST MISIS Mining Institute, G. O. Abramyan, for valuable recommendations and guidance in preparing the article.

For citation: Velichko IM. Comparison of laser scanning and radar interferometry in observing the movements of the earth's surface in open-pit mining. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):10-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-10-15>.

Введение

В настоящее время существует большое количество научных работ, в которых постоянно поднимаются вопросы определения величин деформаций земной поверхности, уступов, линейных инженерных объектов и других сооружений, находящихся в зоне влияния открытых горных работ. Решение маркшейдерских задач по определению этих деформаций проводится с помощью различных современных методов, где особое место занимают воздушное лазерное сканирование и спутниковая радарная интерферометрия.

Известно, что деформация земной поверхности при проведении открытых горных работ приводит к негативным последствиям, а порой и к катастрофическим явлениям. Поэтому выполнение маркшейдерских работ с помощью современных высокоточных методов позволит понять характер проявления и развития возникающих деформационных процессов.

В работе [1] установлено, что 3D-лазерное сканирование позволяет не только своевременно, эффективно и комплексно отслеживать деформации уступов, но и получать достоверные данные об их проявлении. Более того, оно может играть существенную роль в предотвращении оползней и раннем оповещении о них, обеспечивая безопасность людей и их имущества.

Радарная интерферометрия применяется на угледобывающих предприятиях. В последние годы благодаря таким характеристикам, как высокая точность, высокое разрешение, непрерывность, технология интерферометрического радара с синтезированной апертурой (InSAR) быстро развивалась и стала одним из наиболее часто используемых методов измерений в больших пространственных масштабах [2]. Кроме того, InSAR позволяет выявить ранее неизвестные области проседания грунта [3].

Согласно «Правилам обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов», проведение маркшейдерских наблюдений в составе мониторинга устойчивости осуществляется в соответствии с проектом производства маркшейдерских работ. При этом визуальные наблюдения производятся не реже одного раза в месяц. На карьерах инструментальные наблюдения за деформациями бортов, уступов, откосов проводятся перед началом работ по выемке полезного ископаемого. Порядок и цикличность наблюдений определяются проектом производства маркшейдерских работ и уточняются в зависимости от степени развития отработки месторождения. Наряду с этим периодичность наблюдений должна быть не реже одного раза в год.

Объекты исследования: спутниковая радарная интерферометрия и воздушное лазерное сканирование.

Цель исследования: сравнение характеристик спутниковой радарной интерферометрии с характеристиками воздушного лазерного сканирования.

Методы исследования

Анализ возможностей использования в маркшейдерской деятельности спутниковой радарной интерферометрии и воздушного лазерного сканирования при добыче полезных ископаемых открытым способом основывается на обзоре научно-технической информации отечественных и зарубежных авторов, который позволил оценить точности измерений, условия применения, преимущества и недостатки, и факторы, влияющие на эффективность применения этих методов.

Принцип действия метода спутниковой радарной интерферометрии и его характеристики

Комплекс измерений, проводимых с помощью спутниковой радарной интерферометрии, основывается на принципе интерференции электромагнитных волн. Информация о величинах высотных отметок земной поверхности образовывается и собирается благодаря концепции сопоставления фаз отраженного радиолокационного сигнала, а не координат точек, находящихся на двух изображениях объекта наблюдений [4].

Принцип радарной интерферометрии заключается в следующем: радиоволны с частотой 10–17 ГГц направляются в сторону исследуемого объекта. Одна часть поглощается, а другая отражается и регистрируется радаром. Сведения о смещениях и сдвиге фаз отраженного от объекта сигнала получают благодаря сравнению информации, полученной в разные промежутки времени [5].

На рисунке 1 показана принципиальная схема спутниковой радарной интерферометрии на карьере.

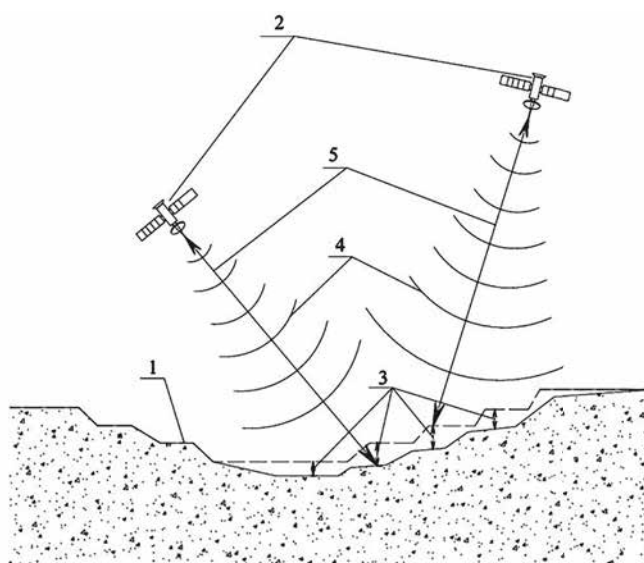


Рис. 1. Принцип спутниковой радарной интерферометрии: 1 – карьер;

2 – спутники; 3 – вертикальное смещение; 4 – радиоволны;

5 – направленный и отраженный сигналы /

Fig. 1. The principle of radar interferometry: 1 – quarry;

2 – satellites; 3 – vertical displacement; 4 – radio waves; 5 – directional and reflected signals

Для проведения работ с помощью спутниковой радарной интерферометрии необходимые исходные данные в виде радиолокационных снимков получают со спутников Sentinel-1. Снимки, полученные с этих спутников, предоставляет Европейское космическое агентство через Sentinel Scientific Data Hub (SSDH) [6].

С помощью данного метода можно определить отдельные районы, где проявление смещений наиболее существенно. Кроме того, его применение дает высокую точность определения скорости смещений от нескольких сантиметров до нескольких миллиметров. Так, в работе [7] приведен пример применения спутниковой интерферометрии при оценке смещений в г. Пыть-Ях. Точность измерений составила 3 см, а скорость поднятия по результатам наблюдений – 25 мм/год.

К тому же существует опыт применения радарной интерферометрии при мониторинге деформаций на Верхнесилезском угольном бассейне в Польше [8].

В современных маркшейдерских работах спутниковая радарная интерферометрия применяется как дополнительный инструмент в составе комплексных наблюдений за деформациями объектов. Как итог совокупное применение радарной интерферометрии и традиционных методов мониторинга актуально при решении таких задач, которые требуют точности и достоверности информации [9].

Преимуществами спутниковой радарной интерферометрии в сравнении с традиционными методами являются:

- большая площадь охвата наблюдений;
- дистанционное определение смещений на всем исследуемом участке;
- использование спутниковых данных для определения смещений [10].
- отсутствие влияния погодных условий и времени суток на сбор интерферометрических снимков [11].

Однако данный метод предполагает использование поверхностей с высоким коэффициентом отражения, что является его недостатком [12].

Существуют причины, усложняющие использование радарной интерферометрии. Например, густая растительность негативно воздействует на полученные результаты и сопоставляемые изображения. Сильная раздробленность рельефа также может быть причиной появления невидимых участков местности на полученных изображениях поверхности [13].

Традиционная методика проведения радарной интерферометрии обеспечивает точность определения вертикальных смещений в диапазоне 20–30 мм на основе пары изображений, полученных в процессе съемки. Методика исследований на основе сети стационарных точек (InSAR) позволяет добиться точности в пределах 3–5 мм [14].

В спутниковой радарной интерферометрии на практике применяются длины волн, находящиеся в диапазоне от 1 мм до 1 м. Фаза колебаний определяется за счет расстояния до цели. Точность определения этого расстояния соответствует длине волны и зависит от нее. То есть чем меньше длина волны радиосигнала, тем выше точность определения расстояния до объекта [15].

Истинные значения вертикальных смещений определяются без учета горизонтальных смещений. При этом расположение спутника и его ориентировка относительно Земли оказывает влияние на точность наблюдений за вертикальными смещениями [16].

Принцип действия метода воздушного лазерного сканирования и его характеристики

Воздушное лазерное сканирование – очень результативный метод. Он позволяет получать необходимую информацию об объектах за счет высокой плотности измерений [17]. Данный вид сканирования производится с беспилотного летательного аппарата. Для сравнения при наземном лазерном сканировании окружающая среда сканируется из фиксированной точки [18].

Создание и определение базовых станций наземной геодезической основы воздушного лазерного сканирования производят согласно СП 317.1325800.2017. Данный нормативный документ содержит в себе требования, которыми нужно руководствоваться при закреплении на местности опорных знаков и определении их координат.

Лазерное сканирование – это метод, при котором происходит высокоскоростное проведение тахеометрической съемки. Отличие от съемки обычным тахеометром заключается в том, что сканер позволяет выполнить съемку объекта за короткий промежуток времени, в то время как тахеометр способен определить расположение лишь нескольких отдельных точек [19].

На рисунке 2 показан принцип воздушного лазерного сканирования.

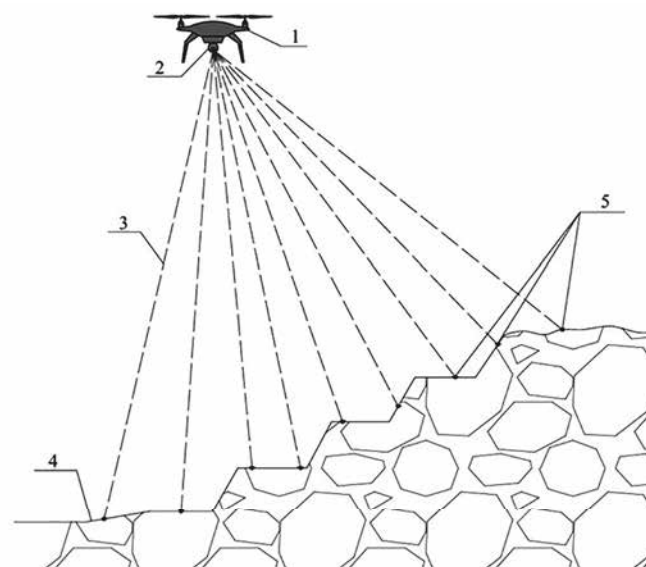


Рис. 2. Принцип воздушного лазерного сканирования:
 1 – беспилотный летательный аппарат; 2 – лазерный сканер;
 3 – направление лазерного пучка; 4 – карьер;
 5 – образующееся облако точек /
Fig. 2. The principle of aerial laser scanning:
 2 – a laser scanner; 3 – the direction of the laser beam; 4 – a quarry;
 5 – a cloud of dots forming

Для выполнения лазерного сканирования создается геодезическое обоснование, состоящее из сети опорных пунктов, установленных вблизи объекта исследования. Координаты пунктов заранее определяются за счет спутниковых измерений [20].

Скорость измерений при использовании данного метода может достигать нескольких сотен тысяч и миллионов точек в секунду. Такие высокие значения скорости достигаются за счет лазерного дальномера, установленного в сканере. При проведении сканирования точек объекта определяются пла-

новые координаты X и Y , высотная Z и интенсивность сигнала, который отражается от поверхности. В результате создается «облако точек». При камеральной обработке «облако точек» с помощью специальных программных обеспечений преобразовывается в трехмерную модель объекта наблюдений [21]. Эти модели позволяют отслеживать изменения формы объектов в зависимости от времени, что, в свою очередь, дает представление о характере и интенсивности возникающих вертикальных и горизонтальных смещений, а также других деформаций.

К основным преимуществам лазерного сканирования относятся:

- выполнение съемок объектов, доступ к которым затруднен;
- возможность проведения работ в местах, где пребывание людей запрещено или нецелесообразно;
- исключение ситуаций, при которых различные внешние факторы оказывают негативное влияние на результаты измерений, что достигается благодаря автоматизации большинства процессов сканирования;
- доведение до минимума полевых работ [22].

Также к плюсам этого метода можно отнести большую концентрацию измеряемых точек, дистанционное измерение, высокую точность и скорость [23]. Большим преимуществом метода является возможность проводить работы в темное время суток [24].

Недостатком воздушного лазерного сканирования является снижение детальности съемки вертикальных поверхностей [25]. Природные факторы, такие как сезонность, погодные условия, снежный покров, ограничивают применение этого метода [26].

Лазерное сканирование также может применяться для определения значений деформаций, возникающих на бортах карьеров [27]. Так, например, на карьере «Кентобе» (Казахстан) определялись смещения карьера. Измерения производились с помощью лазерного сканера. В результате было выяснено, что на точность измерений оказывают угол откоса уступов, их форма и строение.

В работе [12] говорится о том, что лазерное сканирование применяется на территориях, размеры которых могут превышать 30 км. Точность воздушного лазерного сканирования составляет 80–100 мм.

Результаты и их обсуждение

Обзор и анализ научных исследований позволил систематизировать характеристики рассмотренных выше методов. На основании преимуществ, недостатков и других характеристик были выявлены факторы, которые влияют на эффективность радарной интерферометрии и лазерного сканирования. Эти факторы представлены в таблице.

Размеры исследуемой территории и темное время суток не влияют на эффективность радарной интерферометрии и лазерного сканирования.

Погодные условия и сезонность отрицательно влияют на качество полученных результатов с помощью лазерного сканирования, но не снижают эффективность радарной интерферометрии.

Качество спутниковых данных может как снижать, так и увеличивать точность результатов радарной интерферометрии. Это зависит от выбора исходных спутниковых снимков.

Спутниковые радарные снимки никак не влияют на эф-

фективность лазерного сканирования, так как попросту не применяются при использовании данного метода.

Применение дистанционных технологий при выполнении наблюдений за смещениями земной поверхности снижает длительность выполнения работ с помощью радарной интерферометрии и лазерного сканирования и в целом положительно влияет на качество полученных результатов.

Таблица / Table

Факторы, влияющие на эффективность спутниковой радарной интерферометрии и воздушного лазерного сканирования / Factors affecting the effectiveness of satellite radar interferometry and airborne laser scanning

Фактор / Factor	Зависимость повышения эффективности применения методов от различных факторов / The dependence of increasing the effectiveness of the methods on various factors	
	Спутниковая радарная интерферометрия / Satellite radar interferometry	Воздушное лазерное сканирование / Aerial laser scanning
Величина исследуемой территории	Не зависит	Не зависит
Темное время суток	Не зависит	Не зависит
Погодные условия	Не зависит	Зависит
Использование спутниковых данных	Зависит	Не зависит
Густая растительность	Зависит	Зависит
Дистанционное проведение работ	Зависит	Зависит
Отражаемость поверхности	Зависит	Зависит
Сезонность	Не зависит	Зависит
Раздробленность рельефа	Зависит	Зависит

Густая растительность, раздробленность рельефа и отражаемость поверхности объекта наблюдений являются причиной появления участков, из которых невозможно получить полные данные о смещениях земной поверхности и деформациях инженерных сооружений в зоне ведения горных работ. Следовательно, данные факторы негативно влияют на эффективность применения радарной интерферометрии и лазерного сканирования.

Воздушное лазерное сканирование менее точно, чем радарная интерферометрия. Поэтому данный метод может применяться для выполнения топографической съемки карьера и близлежащих территорий, где не требуется миллиметровая точность измерений. С помощью лазерного сканирования также имеется возможность определять значения деформаций карьерных бортов, земной поверхности, различных инженерных сооружений.

Согласно СП 11-104-97, максимально предельная погрешность определения превышений на станции при построении геодезической основы не должна превышать 5 мм. Значения точности метода InSAR спутниковой радарной интерферометрии не превышают указанных в нормативном документе значений. Следовательно, метод InSAR может применяться для создания геодезической разбивочной основы в качестве дополнения к наземным инструментальным.

Оба метода имеют общие преимущества – возможность выполнения съемки обширных территорий и автоматизация выполнения работ. Общим недостатком рассматриваемых методов является то, что положение спутника или сканера относительно наблюдаемого объекта в некоторых случаях может быть причиной появления пустых зон.

У обоих методов существуют как общие характеристики, так и некоторые различия. Поэтому там, где воздушное лазерное сканирование не дает достаточного количества точной информации, применение радарной интерферометрии может с необходимой и достаточной полнотой восполнить пробелы, имеющиеся у лазерного сканирования. В зависимости от различных факторов воздушное лазерное сканирование может дополнять спутниковую радарную интерферометрию.

Заключение

1. В статье приведены основные факторы, которые влияют на результативность применения радарной интерферометрии и лазерного сканирования. Также представлено подробное описание характеристик и принципов действия данных методов.

2. Определены ситуации и условия, при которых наиболее эффективно применение радарной интерферометрии или лазерного сканирования. Ситуации, при которых данные методы взаимодополняют друг друга, будут определяться непосредственно на практике.

3. Выявлены общие преимущества и недостатки рассматриваемых методов наблюдений за сдвигами земной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Guo Y, Li X, Ju S, et al. Utilization of 3D Laser Scanning for Stability Evaluation and Deformation Monitoring of Landslides. *Journal of Environmental and Public Health*. 2022;2:1-14. DOI: 10.1155/2022/8225322.
2. Yao J, Yao X, Wu Z, et al. Research on Surface Deformation of Ordos Coal Mining Area by Integrating Multitemporal D-InSAR and Offset Tracking Technology. *Journal of Sensors*. 2021;4:1-14. DOI: 10.1155/2021/6660922.
3. Wang Z, Zhang J, Yu Y, et al. Monitoring, Analyzing, and Modeling for Single Subsidence Basin in Coal Mining Areas Based on SAR Interferometry with L-Band Data. *Scientific Programming*. 2021;6:1-10. DOI: 10.1155/2021/6662097.
4. Дудников ВЮ. Мониторинг земной поверхности в районах интенсивного недропользования ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» на основе метода спутниковой радарной интерферометрии. Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений, транспорта и переработки трудноизвлекаемых тяжёлых нефтей: мат-лы Всерос. науч.-техн. конф. Ухта, 2022: 192-5. [Dudnikov VYu. Monitoring of the Earth's surface in areas of intensive subsoil use by LUKOIL-Komi LLC based on the method of satellite radar interferometry. *Problems of geology, field development and operation, transport and processing of hard-to-recover heavy oils, Materials of the All-Russian scientific and technical conference*. Ukhta, 2022: 192-5 (In Russ.).]
5. Шаворин ВА, Кулешов АЕ. Современные методы наземной интерферометрии при мониторинге прибортовых массивов на открытых горных работах. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2021;1:111-8. [Shavorin VA, Kuleshov AE. Modern methods of ground-based interferometry for monitoring instrument arrays in open-pit mining. *Interekspo GEO-Sibir*. 2021;1:111-8. (In Russ.).] DOI: 10.33764/2618-981X-2021-1-111-118.
6. Чурсин ИН. Спутниковый мониторинг сдвижения подработанной земной поверхности в Кузбассе с использованием радарной интерферометрии. *Маркшейдерский вестник*. 2021;4:56-60 [Chursin IN. Satellite monitoring of the displacement of the damaged Earth's surface in Kuzbass using radar interferometry. *Mine surveyors bulletin*. 2021;4:56-60 (In Russ.).]
7. Мисюрёв ДА, Васильев ЮВ, Иноземцев ДП. Анализ результатов маркшейдерско-геодезических наблюдений на Пыть-Яхском геодинамическом полигоне. *Нефть и газ*. 2020; 1:30-41. [Misyurev DA, Vasiliev YV, Inozemtsev DP. Analysis of the results of surveying and geodetic observations at the Pyt-Yakh geodynamic polygon. *Oil end Gaz*. 2020;1:30-41 (In Russ.).]
8. Pawłuszek-Filipiak K, Borkowski A. Mining-induced tremors in the light of deformations estimated by satellite SAR interferometry in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Procedia Computer Science*. 2021;181:685-92.
9. Дудников ВЮ, Власов АС, Ланина ТД. Мониторинг земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе метода спутниковой радарной интерферометрии. *Успехи современного естествознания*. 2022;2:54-9. [Dudnikov VY, Vlasov AS, Lanina TD. Monitoring of the Earth's surface in areas of intensive subsurface use based on the method of satellite radar interferometry. *The success of modern natural science*. 2022;2:54-9 (In Russ.).]
10. Акматов ДЖ, Николайчук ВВ, Тихонов АА, Шевчук РВ. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности. *Горная промышленность*. 2020;1:144-7. [Akmатов DJ, Nikolaichuk VV, Tikhonov AA, Shevchuk RV. Radar interferometry as an addition to the classical methods of observing the movement of the Earth's surface. *Mining*. 2020;1:144-7 (In Russ.).] DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147.
11. Нафиева ЕН, Гречищев АВ. Космические радиолокационные системы мониторинга земли. *Экология. Экономика. Информатика*. 2020;2(5):89-95. [Nafieva EN, Grechishchev AV. Space radar earth monitoring systems. *Ecology. Economy. Computer science*. 2020;2(5):89-95 (In Russ.).] DOI: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-89-95.
12. Шевчук РВ, Маневич АИ, Акматов ДЖ и др. Современные методы, методики и технические средства мониторинга движений земной коры. *Горная промышленность*. 2022;5:99-104. [Shevchuk RV, Manevich AI, Akmатов DJ, et al. Modern methods, techniques and technical means of monitoring the movements of the Earth's crust. *Mining*. 2022;5:99-104. (In Russ.).]
13. Энтин АЛ, Михайлюкова ПГ, Кедич АИ и др. Современный опыт использования радиолокационной интерферометрии для регистрации изменений высотных отметок поверхности суши. *Геоморфология*. 2022;53(2):27-42. [Entin AL, Mikhailyukova PG, Kedich AI, et al. Modern experience of using radar interferometry to record changes in elevation of the land surface. *Geomorphology*. 2022;53(2):27-42. (In Russ.).]
14. Арсеньев-Образцов СС, Поздняков АП. Применение метода радарной спутниковой интерферометрии InSAR для решения задач промысловой геологии и разработки нефтегазовых месторождений. *Горная промышленность*. 2020;3:38-44. [Arsenyev-Obraztsov SS, Pozdnyakov AP. Application of the InSAR radar satellite interferometry method for solving problems of field geology and development of oil and gas fields. *Mining*. 2020;3:38-44 (In Russ.).]
15. Илюхин ДА, Новоженен СЮ, Выстрчил МГ, и др. Оценка возможности применения интерферометрии устойчивых отражателей для контроля сдвижений бортов карьера. *Маркшейдерский вестник*. 2022;2:41-6. [Ilyukhin DA, Novozhenin SYu, Vystrechil MG, et al. Evaluation of the possibility of using stable reflector interferometry to control the movement of the sides of the quarry. *Mine surveyors bulletin*. 2022;2:41-6 (In Russ.).]

16. Кузьмин ДК. Моделирование смещений земной поверхности, полученных различными спутниками со встроенным модулем PCA (на примере мониторинга месторождений нефти и газа). *Проблемы недропользования*. 2021;2:94-104. [Kuzmin DK. Modeling of the Earth's surface displacements obtained by various satellites with the built-in PCA module (using the example of monitoring oil and gas fields). *Problems of subsoil use*. 2021;2:94-104. (In Russ.)]. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.02.094.
17. Васанов АЕ, Шляхова ММ. Метод воздушного лазерного сканирования. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2023;4(1):162-6. [Vasanov AE, Shlyakhova MM. Method of aerial laser scanning. *Interekspo GEO-Sibir*. 2023;4(1):162-6. (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-162-166.
18. Sarvesh Kumar Singh, Bikram Pratap Banerjee, Simit Raval. A review of laser scanning for geological and geotechnical applications in underground mining. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023;33:133-54.
19. Шереметинский АВ, Бударова ВА, Мартынова НГ и др. Применение наземного лазерного сканирования в государственном кадастре недвижимости. *Московский экономический журнал*. 2021;4:53-8. [Sheremetinsky AV, Budarova VA, Martynova NG, et al. The use of ground-based laser scanning in the state real estate cadaster. *Moscow Economic Journal*. 2021;4:53-8. (In Russ.)]. DOI: 10.24412/2413-046X-2021-10240.
20. Ханнанов РР. Лазерное сканирование для определения насыпных дамб. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2023;1:149-53. [Hannanov RR. Laser scanning for the determination of bulk dams. *Interekspo GEO-Sibir*. 2023;1:149-53. (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-1-1-149-153.
21. Аникаева АД, Мусихин ВВ, Столбов ИА, и др. Современные геодезические и маркшейдерские технологии, применяемые при разработке нефтяных и газовых месторождений. *Master's journal*. 2022;2:68-87. [Anikaeva AD, Musikhin VV, Stolbov IA, et al. Modern geodetic and surveying technologies used in the development of oil and gas fields. *Master's journal*. 2022;2:68-87. (In Russ.)].
22. Кулеш АА. Возможности и преимущества лазерного сканирования при 3D-проектировании промышленных объектов. *Инновации и инвестиции*. 2023;2:265-7. [Kulesh AA. Possibilities and advantages of laser scanning in 3D design of industrial facilities. *Innovation and investment*. 2023;2:265-7. (In Russ.)].
23. Мусина ГА. Сравнительный анализ современных методов деформационного мониторинга. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2023;4(2):82-90. [Musina GA. Comparative analysis of modern methods of deformation monitoring. *Interekspo GEO-Sibir*. 2023;4(2):82-90. (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-4-2-82-90.
24. Гура ДА, Дубенко ЮВ, Марковский ИГ. Мониторинг объектов транспортной инфраструктуры с применением сканирующих технологий. *Технологии техносферной безопасности*. 2020;2:74-86. [Gura DA, Dubenko YuV, Markovsky IG. Monitoring of transport infrastructure facilities using scanning technologies. *Technologies technosphere safety*. 2020;2:74-86. (In Russ.)]. DOI: 10.25257/TTS.2020.2.88.74-86.
25. Каминская ТА. Лазерные сканирующие системы. *Инновации. Наука. Образование*. 2021;45:125-7. [Kaminskaya TA. Laser scanning systems. *Innovation. Science. Education*. 2021;45:125-7. (In Russ.)].
26. Долгополов ДВ, Бабарыкин МЮ, Жидиляева ЕВ, и др. Применение технологии воздушного лазерного сканирования при проведении геотехнического мониторинга на трубопроводном транспорте. *Мониторинг. Наука и технологии*. 2022;2:25-34. [Dolgopolov DV, Babarykin MYu, Zhilyaeva EV, et al. Application of airborne laser scanning technology during geotechnical monitoring in pipeline transport. *Monitoring. Science and Technology*. 2022;2:25-34. (In Russ.)]. DOI: 10.25714/MNT.2022.52.003.
27. Бесимбаева ОГ, Низаметдинов ФК, Олейникова ЕА. Использование технологий лазерного сканирования в наблюдениях за деформациями бортов карьеров. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2020;1(1):152-60. [Besimbayeva OG, Nizametdinov FK, Oleinikova EA. The use of laser scanning technologies in observations of deformations of quarry sides. *Interekspo GEO-Sibir*. 2020;1(1):152-60. (In Russ.)]. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-1-1-152-160.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Иван Михайлович Величко –
аспирант, Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования «На-
циональный исследовательский технологический универси-
тет «МИСИС», 119049, г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: ivan.velichko98@gmail.com

ABOUT THE AUTHOR

Ivan M. Velichko –
Graduate Student, Federal State Autonomous Educational
Institution of Higher Education «National Research
Technological University «MISIS», 119049, Moscow, Russian
Federation, e-mail: ivan.velichko98@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию: 12.03.2025.

Поступила после рецензирования: 15.05.2025.

Принята к публикации: 19.05.2025.

Article info

Received: 12.03.2025.

Revised: 15.05.2025.

Accepted: 19.05.2025.

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА

Ф. М. Голубев[✉], В. П. Сажнев

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, Российская Федерация

[✉] f_golubev@list.ru

Аннотация: На основании экспериментальных данных определены оптимальные подходы к формированию трехмерных моделей объектов поверхности различных размеров. Установлены граничные условия применения в качестве опорных точек полиуретановых отражателей и тахеометрических призм. Представленные результаты исследований позволяют оптимизировать позиционирование облаков точек в зависимости от масштаба сканируемого объекта, что существенно ускоряет создание трехмерных моделей горных выработок и подработанных зданий.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, облако точек, интенсивность отраженного сигнала, фасадная съемка, опорные точки

Благодарности, признательность, финансирование: Исследования проводились в ФГБНУ «РАНИМИ» в рамках государственного задания (№ FRSR-2023-0002).

Для цитирования: Голубев ФМ, Сажнев ВП. Оптимизация формирования трехмерных моделей объектов поверхности с использованием наземного лазерного сканера. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):16-20. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-16-20>.

OPTIMIZATION OF THE FORMATION OF THREE-DIMENSIONAL MODELS OF SURFACE OBJECTS USING A TERRESTRIAL LASER SCANNER

F. M. Golubev[✉], V. P. Sazhnev

Federal State Budgetary Scientific Institution «Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying», Donetsk, Russian Federation

[✉] f_golubev@list.ru

Abstract: Based on experimental data, the article defines optimal approaches to the formation of three-dimensional models of surface objects of various sizes. Boundary conditions for the use of polyurethane reflectors and tachymetric prisms as reference points are established. The presented research results allow us to optimize the positioning of point clouds depending on the scale of the scanned object, which significantly accelerates the creation of three-dimensional models of mine workings and undermining buildings.

Keywords: terrestrial laser scanning, point cloud, reflected signal intensity, facade survey, reference points

Acknowledgments, funding, financial Support: The research was conducted at the Federal State Budgetary Scientific Institution «RANIMI» within the framework of the state assignment (No. FRSR-2023-0002).

For citation: Golubev F M, Sazhnev V P. Optimization of the formation of three-dimensional models of surface objects using a terrestrial laser scanner. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):16-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-16-20>.

Введение

Геомеханическое обеспечение открытой добычи полезных ископаемых, определение критериев устойчивости бортов карьеров, разрезов и отвалов, а также обеспечение безопасной эксплуатации подрабатываемых объектов поверхности подразумевают постоянное маркшейдерско-геодезическое сопровождение. В условиях дефицита квалифицированных инженерных кадров, невозможности применения беспилотных летательных аппаратов и постоянно возникающих задач, связанных с мониторингом промышленных и гражданских объектов, описанных в нормативном документе «Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль. Инструкция по производству маркшейдерских работ (РД 07-603-03)», актуальным вопросом становится оптимизация геодезических и маркшейдерских работ.

Перспективным направлением для решения описанных задач является применение наземного лазерного сканирования и создание трехмерных моделей, что позволяет решать технические задачи как при добыче полезных ископаемых открытым способом, так и при восстановлении поврежденного жилого фонда.

Согласно [1], обработка результатов наземного лазерного сканирования состоит из следующих этапов:

- позиционирования облаков точек;
- трансформации облаков точек в необходимую систему координат;
- создания поверхностей или solid-моделей (при необходимости).

Одним из наиболее трудоемких процессов при создании трехмерных моделей объектов поверхности является формирование единого облака точек из облаков, снятых с различных пунктов стояния сканера.

Автор [2] рассматривает несколько способов объединения облаков точек:

- визуальный способ;
- по характерным точкам;
- по опорным знакам.

Стоит отметить, что применение первых двух методов зачастую не позволяет достичь удовлетворительной точности. Аналогичные сложности возникают и при использовании наземных лазерных сканеров для фасадной съемки [3].

Согласно описанному в [4, 5] опыту обработки результатов лазерного сканирования, применение различного программного обеспечения для обработки облаков точек в автоматическом режиме не позволяет их корректно позиционировать без должного геодезического обоснования. Для создания такого обоснования и ориентирования получаемых в результате работы лазерной сканирующей системы снимков относительно друг друга необходимо, чтобы на каждом из них было как минимум три точки, присутствующие на предыдущем и последующем снимках. Это требование существенно повышает трудозатраты, делая необходимым создание масштабной сети марок (опорных точек).

Гораздо более рациональным подходом является определение координат марок в глобальной системе координат с последующим ориентированием снимков уже не относительно друг друга, а относительно единой системы. Такой подход позволяет оптимизировать работы по ориентированию снимков и снизить количество необходимых опорных точек в два раза, однако требования к светоотражающим свойствам

опорных точек многократно возрастают. Взаимосвязь между интенсивностью (I) отраженного сигнала и коэффициентом r отражающей поверхности в геометрической оптике определяется выражением Ламберта [3].

Известно, что измерения объектов из материалов с высоким коэффициентом отражения в результате дают более надежные и точные результаты [6–9].

С учетом вышесказанного и описанных в [10–20] возможностях наземного лазерного сканирования становится очевидна актуальность совершенствования методики проведения съемочных работ.

Цель работы: оптимизация формирования трехмерных моделей объектов поверхности с использованием наземного лазерного сканера.

Материал и методы исследований

Наиболее распространенным видом отражателей, применяемых в качестве опорных точек, являются полиуретановые марки. Видимость светоотражающих полиуретановых поверхностей требует крайне высокой плотности сканирования.

Для обеспечения видимости таких марок необходимо соблюдение следующей зависимости:

$$\Delta\varphi_{MAX} \leq 2 \arctg \left(\frac{l}{2 \cdot R} \right),$$

где $\Delta\varphi_{MAX}$ – максимальный допустимый угловой шаг сканирования, градус; l – размер марки внешнего ориентирования, м; R – удаление марки внешнего ориентирования от лазерной сканирующей системы, м.

Результаты исследований и их обсуждение

Интенсивность отраженного сигнала полиуретановых марок существенно снижается с увеличением расстояния между ними и точкой расположения наземного лазерного сканера (рис. 1).

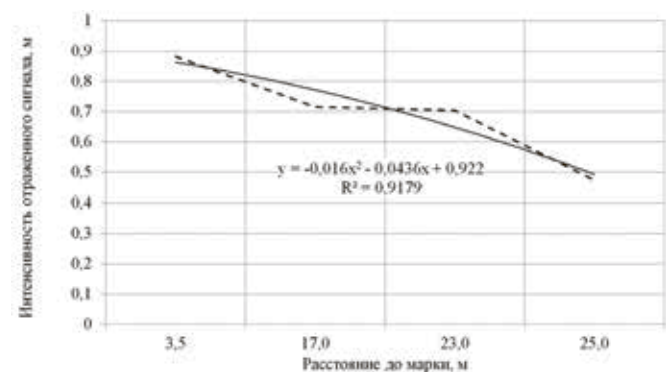


Рис. 1. Результаты исследования интенсивности отраженного сигнала полиуретановых марок /
Fig. 1. Results of the study of the intensity of the reflected signal of polyurethane marks

Анализ приведенной на рисунке 1 зависимости показывает, что уже на расстоянии 25 м от сканера интенсивность отраженного сигнала полиуретановых марок падает более чем в два раза. При увеличении расстояния до 50 м интенсивность отраженного сигнала снижается до показателей уровня снимаемых объектов поверхности и марки становятся неопределимыми.

Подобные свойства позволяют эффективно использовать марки при проведении фасадных съемок зданий (рис. 2).

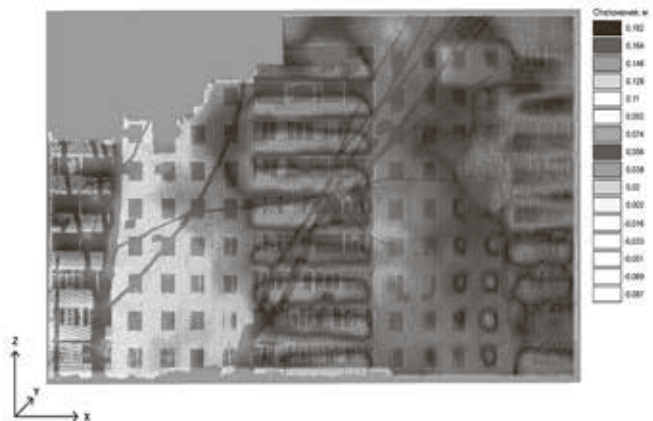


Рис. 2. Модель главного фасада девятиэтажного дома с нанесенным градиентом отклонения панелей от вертикали /
Fig. 2. Model of the main facade of a nine-story building with a gradient of panel deviation from the vertical applied

Для получения адекватной модели результаты сканирования следует сравнивать с результатами теодолитной съемки углов здания. Пример такого сравнения приведен на рисунке 3.

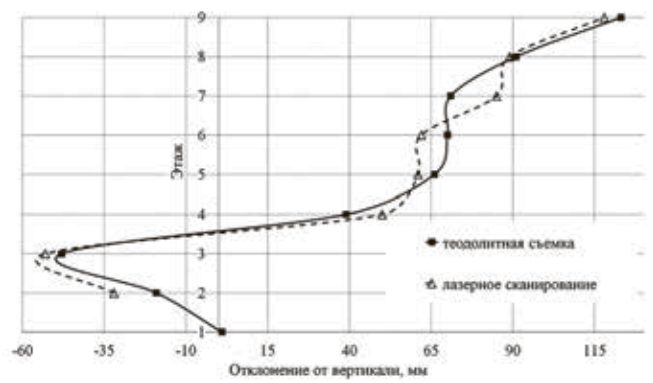


Рис. 3. Сравнение результатов наземного лазерного сканирования с теодолитной съемкой /
Fig. 3. Comparison of the results of terrestrial laser scanning with theodolite survey

Учитывая, что светоотражающие полиуретановые марки не идентифицируются на снимках уже на расстояниях 50–100 м, их использование нецелесообразно при применении мощных наземных лазерных сканеров и сканировании масштабных объектов. Помимо необходимости использования сотен марок для формирования трехмерных геодезических моделей крупных объектов, таких как карьеры или участки со сложной структурой рельефа, использование полиуретановых марок делает необходимым избыточное количество точек стояния сканера, что увеличивает трудозатраты в десятки раз.

Стоит отметить, что опыт применения наземного лазерного сканера RIEGL LMS420i на Каранском гранитном карьере позволяет сделать вывод об удовлетворительной видимости его бортов, вплоть до расстояния 700–800 м. Пример результатов сканирования наземным лазерным сканером приведен на рисунке 4.

Для оптимизации ведения работ по съемке и высокоточному позиционированию облаков точек была разработана методика применения тахеометрических призм в качестве опорных точек при позиционировании снимков, полученных при наземном лазерном сканировании.

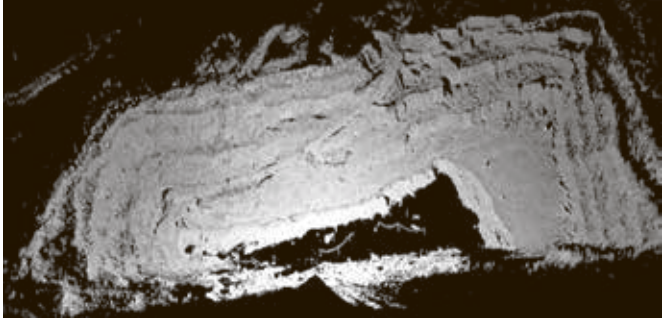


Рис. 4. Результаты съемки участка Каранского карьера наземным лазерным сканером RIEGL LMS420i с одной точки стояния /
Fig. 4. Results of surveying the Karansky quarry area with a RIEGL LMS420i ground laser scanner from one standpoint

Экспериментальным путем установлено, что высокая интенсивность отраженного сигнала, свойственная для тахеометрических призм, позволяет их идентифицировать на снимках с расстояния 600–700 м (рис. 5).

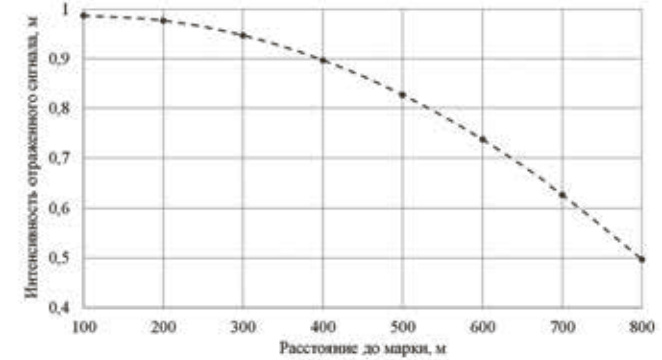


Рис. 5. Результаты исследования интенсивности отраженного сигнала тахеометрических светоотражающих призм /
Fig. 5. Results of the study of the intensity of the reflected signal of tacheometric reflective prisms

Анализ интенсивности отраженного сигнала снимка, включающего более миллиона точек, при ее определении в интервале от 0 до 1 приведен в таблице.

Таблица / Table
Процентный состав точек с различной интенсивностью отраженного сигнала /
Percentage composition of points with different reflected signal intensity

Интервал интенсивности отраженного сигнала / Reflected signal intensity range	Процент от общего количества точек / Percentage of total points
Менее чем 0,10	23,50
От 0,10 до 0,20	28,20
От 0,20 до 0,30	29,00
От 0,30 до 0,40	18,50
От 0,40 до 0,60	1,10
Более 0,46	0,01

Приведенные в таблице данные позволяют не только констатировать, что около 99 % зафиксированных лазерным сканером точек имеют интенсивность отражения в пределах 0,1–0,4, но и выделить пределы интенсивности отраженного сигнала светоотражающих призм, расположенных на расстоянии 500–600 м от точки стояния сканера, которые в зависимости от погодных условий варьировались в интервале 0,46–0,78.

Выводы

1. Анализ полученных в ходе проведенного исследования данных позволяет констатировать факт целесообразности применения полиуретановых светоотражателей при сканировании объектов относительно небольших размеров (не более 250 м²). Объекты большего масштаба рационально сканировать с применением в качестве опорных точек тахеометрических призм. За счет возможности идентификации светоотражающих призм с любой точки стояния наземного лазерного сканера на порядок сокращается количество необходимых опорных точек, что в свою очередь снижает затраты времени на создание геодезического обоснования для формирования трехмерной модели месторождения.

2. Кроме того, использование тахеометрических призм в качестве опорных точек при сканировании позволяет повысить качество позиционирования снимков. Каждая призма устанавливается на отцентрированный штатив за счет чего возможно точное определение координат отражателей. Определение координат расположения призм, установленных на

штативах, возможно с применением GNSS-приемников, что отменяет необходимость проведения полигонометрии.

3. Важным условием успешной съемки является правильный выбор места установки сканера. Необходимо чтобы между сканером и опорной точкой была прямая видимость исследуемого участка, отсутствовала крупная растительность (кусты, деревья).

4. Применение данного подхода позволяет оптимизировать процесс создания трехмерных моделей объектов поверхности и горных выработок с применением наземного лазерного сканера, что дает возможность формировать модели любого масштаба за три-четыре рабочих дня при задействовании штата из четырех-пяти специалистов.

5. Результаты проведенного анализа позволили разработать предложения по оптимизации применения наземного лазерного сканера при маркшейдерско-геодезическом обеспечении предприятий горной промышленности и обеспечении безопасной эксплуатации подработанных зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баринова ТА, Катрич АЕ. Наземное лазерное сканирование. *Научные достижения и открытия современной молодёжи: сб. ст. победителей Межд. науч.-практ. конф.* Пенза, 2017;(1):1569-71. [Barinova TA, Katrich AE. Ground-based laser scanning. *Scientific achievements and discoveries of modern youth: A collection of articles by the winners of the International Scientific and Practical Conference.* Penza, 2017;(1):1569-71 (In Russ.)]
2. Щенявская ЛА, Шалая ЛА. Технология объединения пространственных данных, полученных по результатам наземного лазерного сканирования, цифровой аэрофотосъемки и ручного лазерного сканирования. *Молодежная наука: сб. лучших научных работ молодых ученых.* Краснодар, 2024: 509-15. [Shchenyavskaya LA, Shalaya AA. Technology of combining spatial data obtained from the results of terrestrial laser scanning, digital aerial photography and manual laser scanning. *Youth science: A collection of the best scientific works of young scientists.* Krasnodar, 2024; 509-15 (In Russ.)]
3. Меньшикова СН, Мармилов АН, Кондрашин КГ. Съемка фасадов зданий методами наземного лазерного сканирования. *Потенциал интеллектуально одаренной молодежи – развитию науки и образования.* Астрахань, 2022: 191-94. [Menshchikova SN, Marmilov AN, Kondrashin KG. Surveying building facades using terrestrial laser scanning methods. *The potential of intellectually gifted youth – for the development of science and education.* Astrakhan, 2022; 191-4 (In Russ.)]
4. Комиссаров АВ. Лазерное сканирование и трехмерное моделирование. Новосибирск, 2020: 58. [Komissarov AV. Laser scanning and three-dimensional modeling. Novosibirsk, 2020: 58 (In Russ.)]
5. Середович ВА, Комиссаров АВ, Широкова ТА. Наземное лазерное сканирование: монография. Новосибирск, 2009: 259. [Seredovich VA, Komissarov AV, Komissarov DV, et al. Terrestrial laser scanning: monograph. Novosibirsk, 2009 (In Russ.)]
6. Пат. 2736506 C1 Российская Федерация, МПК G01C 11/06, G01S 17/89, G01S 17/87. Способ автоматического локального повышения точности данных воздушного лазерного сканирования с использованием данных наземного лазерного сканирования: / Баденко В.Л., Федотов А.А., Зотов Д.К., Волгин Ю.Д., Муромцева Н.С.; заявитель ФГАОУ ВО «СПбПУ». – № 2019145104; заявл. 30.12.2019; опубл. 17.11.2020. 11 с. [Badenko VL, Fedotov AA, Zotov DK, et al. Method for automatic local improvement of airborne laser scanning data accuracy using terrestrial laser scanning data. Russian Federation patent 2736506 C1. 17 November 2020 (In Russ.)]
7. Неволин АГ, Медведская ТМ. Обработка результатов наземного лазерного сканирования с учетом коэффициента отражения сигнала. *Вестник Сибирской государственной геодезической академии.* Новосибирск, 2014;1(25):47-53. [Nevolin AG, Medvedskaya TM. Processing of the results of terrestrial laser scanning taking into account the signal reflection coefficient. *Bulletin of the Siberian State Geodetic Academy.* Novosibirsk, 2014; 1(25):47-53 (In Russ.)]
8. Грищенко НН, Голубев ФМ, Сажнев ВП. Основы методики создания цифровых моделей искусственно измененных участков рельефа. *Труды РАНМИ: сб. науч. тр. Донецк,* 2024;1(39):109-20. [Grishchenkov NN, Golubev FM, Sazhnev VP. Fundamentals of the methodology for creating digital models of artificially modified relief areas. *Proceedings of RANIMI.* Donetsk, 2024; 1(39):109-20 (In Russ.)]
9. Голубев ФМ, Сушко ЕТ, Жулковский ГВ и др. Методика инструментального определения отклонения внешних несущих конструктивных элементов панельных зданий от вертикали. *9-я Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса»: сб. науч. тр. Донецк,* 2023: 47-54. [Golubev FM, Sushko ET, Zhulkovsky GV, et al. Methodology for instrumental determination of deviation of external load-bearing structural elements of panel buildings from the vertical. *Innovative Prospects of Donbass. 9th International Scientific and Practical Conference.* Donetsk, 2023; 47-54 (In Russ.)]
10. Chen M, Tang F, Pan J. Using Polar Grid for Building Extraction in Terrestrial Laser Scanning Data. IGARSS 2020. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* Waikoloa, 2020; 1632-34. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324001.
11. Brovkina O, Novotný J, Navrátilová B, et al. Comparison of Tree Attribute Estimates from Airborne and Terrestrial Laser Scanning and Field Data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS.* Brussels, 2021;8065-8. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553082.
12. Xu Y, Stilla U. Toward Building and Civil Infrastructure Reconstruction From Point Clouds: A Review on Data and Key Techniques. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2021;(14):2857-85. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3060568.
13. Xu Y, Li S, You H, et al. Retrieval of Canopy Gap Fraction From Terrestrial Laser Scanning Data Based on the Monte Carlo Method. *Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2022;(19):1-5. DOI: 10.1109/LGRS.2021.3061540.
14. Wu Y, Li S, Xu Y, et al. A Laser Point Area Model for Canopy Gap Fraction Retrieval Based on Terrestrial Laser Scanning Data. *Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2024;(21):1-5. DOI: 10.1109/LGRS.2023.3348120.

15. Горбань НН, Васильев ГГ, Сальников АП и др. Разработка схемы размещения сканерных станций при наземном лазерном сканировании резервуаров с учетом требований к погрешности результатов измерений. *Нефтяное хозяйство*. 2020;2:74-8. [Gorban NN, Vasiliev GG, Salnikov AP, et al. Development of a layout scheme for scanner stations during ground-based laser scanning of tanks, taking into account the requirements for the error of measurement results. *Oil industry*. 2020; (2):74-8 (In Russ.)]
16. Заброда ОС, Гура ДА, Дражецкий ЕА. Использование технологии лазерного сканирования в области градостроительства. *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. 2021;4:86-90. [Zabroda OS, Gura DA, Drazhetsky DA, et al. Use of laser scanning technology in urban planning. *Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. 2021(4):86-90 (In Russ.)]
17. Грибкова ИС, Кузьмин, Щенявская ЛА. Современные методы и приборы геодезического мониторинга зданий и сооружений. *Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник)*. 2023;2:44-7. [Gribkova IS, Kuzmin RO, Shchenyavskaya LA. Modern methods and devices for geodetic monitoring of buildings and structures. *Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. 2023; (2):44-7 (In Russ.)]
18. Панютисцева АА, Беркова ЕД, Гура ДА. Применение современных методов сбора геоданных для целей мониторинга территорий. *Астраханский вестник экологического образования*. 2023;6(78):58-63. [Panyutischeva AA, Berkova ED, Gura DA, et al. Application of modern methods of collecting geodata for the purposes of monitoring territories. *Astrakhan Bulletin of Environmental Education*. 2023;6(78):58-63 (In Russ.)]. DOI: 10.36698/2304-5957-2023-6-58-63.
19. Вальков ВА, Валькова ЕО, Мустафин МГ. Методика уточнения цифровых моделей рельефа открытых горных выработок по материалам лазерного сканирования и аэрофотосъемки. *Маркшейдерия и недропользование*. 2023;3(125):40-52. [Valkov VA, Valkova EO, Mustafin MG. Methodology for refining digital relief models of open mine workings based on laser scanning and aerial photography. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023;3(125):40-52 (In Russ.)]. DOI: 10.56195/20793332_2023_3_40_52.
20. Гусев ВН, Филиппов АА. Оптимизация процесса классификации данных лазерного сканирования для преодоления избыточности. *Маркшейдерия и недропользование*. – 2024;1(129):80-9. [Gusev VN, Filippov AA. Optimization of the laser scanning data classification process to overcome redundancy. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024;1(129):80-9 (In Russ.)]. DOI: 10.56195/20793332_2024_1_80_89.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Филипп Максимович Голубев –

канд. техн. наук, заведующий отделом, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», 283086, г. Донецк, Российская Федерация, e-mail: f_golubev@list.ru

Вячеслав Петрович Сажнев –

доцент, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», 283086, г. Донецк, Российская Федерация, e-mail: vyacheslav.p.sazhnev@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Filipp M. Golubev –

Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Federal State Budgetary Scientific Institution «Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying», 283086, Donetsk, Russian Federation, e-mail: f_golubev@list.ru

Vyacheslav P. Sazhnev –

Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «Republican Academic Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying», 283086, Donetsk, Russian Federation, e-mail: vyacheslav.p.sazhnev@yandex.ru

Критерии авторства / Contribution:

Ф. М. Голубев – постановка задачи исследования, проведение эксперимента, анализ результатов исследования, написание текста статьи; В. П. Сажнев – проведение эксперимента, выполнение работы по систематизации материала, получение и подготовка данных для анализа, написание текста статьи. / F.M. Golubev – setting the research problem, conducting the experiment, analyzing the research results, writing the text of the article; V. P. Sazhnev – Conducting an experiment, performing work on systematizing the material, obtaining and preparing data for analysis, writing the text of the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 24.03.2025.

Поступила после рецензирования: 20.05.2025.

Принята к публикации: 22.05.2025.

Article info

Received: 24.03.2025.

Revised: 20.05.2025.

Accepted: 22.05.2025.

МАРКШЕЙДЕРСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ СКВАЖИН

Б. Н. Бухтояров[✉], О. Р. Старикова

ООО «Газпром нефть шельф», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ z9851275712@gmail.com

Аннотация: От достоверной информации о пространственном положении скважины зависит корректность геологической модели, эффективность разработки месторождения, промышленная безопасность и в конечном итоге экономические показатели проекта. Рассмотрены проблемные вопросы контроля пространственного положения скважин при разработке нефтегазовых месторождений, даны предложения по усовершенствованию процедуры контроля пространственного положения скважин маркшейдерскими службами операторов разработки месторождений. Освещены основные элементы позиционирования скважин при выполнении измерений забойными телесистемами, приведена методика расчета азимута и зенитного угла на основании данных телеметрических систем, описаны основные источники ошибок и применяемые методы коррекции измерений.

Ключевые слова: маркшейдерский контроль траектории скважины, проводка скважин, забойные телеметрические системы (MWD), геомагнитные модели, модель ошибок, эллипс неопределенности

Для цитирования: Бухтояров БН, Старикова ОР. Маркшейдерский контроль пространственного положения скважин. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):21-28. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-21-28>.

SURVEYOR CONTROL OF SPATIAL POSITION OF WELLS

B. N. Bukhtoyarov[✉], O. R. Starikova

Gazprom Neft Shelf LLC, St. Petersburg, Russian Federation

✉ z9851275712@gmail.com

Abstract: The correctness of the geological model, field development efficiency, industrial safety and, ultimately, the economic performance of the project depend on reliable information about the spatial position of the well. The article considers the problematic issues of well spatial position control during oil and gas field development, gives proposals for improving the procedure of well spatial position control by surveyor services of field development operators. The basic elements of well positioning when performing measurements by downhole telemetry systems are covered, the method of calculation of azimuth and zenith angle on the basis of telemetry systems data is given, the main sources of errors and applied methods of measurement correction are described.

Keywords: Well trajectory surveying, well wiring, downhole telemetry systems (MWD), geomagnetic models, error model, uncertainty ellipse

For citation: Bukhtoyarov BN, Starikova OR. Surveyor control of spatial position of wells. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):21-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-21-28>.

Введение

Проблемные вопросы состояния маркшейдерского обеспечения разработки нефтегазовых месторождений неоднократно поднимались в профильных изданиях. Так, авторы согласны с выводами С. Н. Никифорова [1] о деградации нефтегазовой маркшейдерии в сторону чисто геодезических и землеустроительных работ и недостаточном участии маркшейдерских служб в контроле определения про-

странственного положения скважин. В связи с этим в профессиональном маркшейдерском сообществе отношение к нефтегазовой маркшейдерии неоднозначное.

К основным задачам маркшейдерского обеспечения безопасного и эффективного недропользования относится проведение исчерпывающего комплекса маркшейдерских работ, в том числе определение пространственно-геометрических параметров горных разработок и подземных сооружений, обе-

спечение рациональной разработки МПИ и охраны недр вне зависимости от вида добываемого полезного ископаемого.

При разработке месторождений углеводородного сырья (далее – УВС) главными и единственными подземными сооружениями остаются скважины. На определение пространственно-геометрических характеристик скважины распространяется действие пункта 3в «Положения о лицензировании маркшейдерских работ» [2].

В общем случае скважина – это горная выработка круглого сечения, пробуренная с поверхности земли или из горной выработки без доступа человека к забою, диаметр которой много меньше ее глубины. В нефтегазовой отрасли различают вертикальные скважины (зенитный угол до 5°) и наклонно-направленные. К наклонно-направленным также относятся горизонтальные скважины (с зенитными углами более 70°).

Горизонтальные скважины размещаются внутри продуктивного пласта-коллектора на протяженном участке, что позволяет повысить уровни добычи углеводородов при сокращении общего числа скважин, что делает их экономически выгодными несмотря на более высокую стоимость. Бурение горизонтальных скважин сделало возможным доступ к сложным и ранее недоступным объектам, с их помощью ведется добыча на шельфе, где нет возможности размещения кустов скважин и необходимо вести бурение с платформ или берега.

Средняя протяженность скважин на суше от 1 500 до 4 тыс. м, на шельфовых месторождениях скважины протяженностью 5–7 тыс. м не редкость, самые протяженные имеют глубины по стволу до 15 км.

По данным агентства Bloomberg [3], за 11 месяцев 2023 года в РФ пробурено 7 930 нефтяных эксплуатационных скважин общей протяженностью 28 100 км, около половины из них имеют горизонтальное заканчивание. Стоимость скважин составляет от нескольких миллионов долларов на суше до десятков миллионов долларов на шельфовых месторождениях. Затраты на строительство эксплуатационных скважин составляют основную статью капитальных вложений операторов добычи УВС.

Основная задача при проводке скважины заключается в достижении геологической цели – участка недр, определенного по геологической модели, из которого планируется добыча УВС данной скважиной и обеспечение проектных показателей добычи. Геометрические параметры траекторий пробуренных скважин используются для построения и актуализации геологических и гидродинамических моделей залежей УВС. Адекватность модельных построений напрямую зависит от корректности положения скважин, на основе которых они строятся, ошибки и неопределенности их траекторий ведут к снижению качества моделей по принципу мусор на входе – мусор на выходе.

Основные проблемы, связанные с низким качеством проводки и пространственной точностью скважин:

- недостижение геологических целей при вскрытии продуктивных объектов и недостижение плановых показателей добычи УВС;
- рост неопределенности геологического и гидродинамического моделирования;
- риск аварий из-за взаимного пересечения при бурении скважин;
- сужение пространства для маневра из-за больших эллипсов неопределенности и, как следствие, невозможность

строительства новых скважин нужной протяженности там, где они необходимы. Итог – неполное извлечение нефти;

- нарушения проектной кривизны по стволу, приводящие к непроходимости скважины и невозможности спуска колонны и инструментов.

Неопределенности геологической и гидродинамической моделей могут приводить к неверным решениям при выборе геологических целей при планировании новых скважин и негативно влиять на режимы эксплуатации месторождений, приводить к снижению коэффициента извлечения УВС, в конечном итоге ведут к снижению эффективности проектов. Все обозначенные риски особенно актуальны при разработке месторождений горизонтальными скважинами, эффективность которых напрямую зависит от позиционной точности их размещения.

Задача проводки скважин по проектным направлениям и определение их фактических траекторий лежит на специалистах нефтесервисных компаний. Как правило, это группа полевых инженеров по геонавигации на буровой установке, которые обеспечивают непрерывное управление бурением и измерения в скважине в режиме 24 на 7, а также инженер-руководитель в офисе с функцией координатора процесса. В соответствии с действующим профессиональным стандартом [4] инженер по геонавигации – это специалист, имеющий образование по нескольким специальностям.

Специальности, которыми должен обладать инженер по геонавигации:

- разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений;
- бурение нефтяных и газовых скважин;
- информационно-измерительная техника и технологии.

Взаимодействие с буровыми и нефтесервисными подрядчиками, включая контроль качества выполняемых работ, со стороны операторов разработки осуществляют специалисты геологических служб и буровых управлений. Все перечисленные специалисты как подрядных организаций, так и операторов разработки в соответствии со специализацией могут иметь различную степень подготовки в области геодезии и картографии, но специалистами по геометризации подземных сооружений на уровне требований лицензирования маркшейдерских работ они не являются. Программы подготовки геологов, буровиков, разработчиков содержат только базовые понятия о геодезии и картографии и не включают специальные дисциплины по обработке пространственных измерений (теория математической обработки измерений и т.д.).

Участие маркшейдерских служб операторов сведено к геодезическим работам: выдаче акта заложения скважины (координаты устья, направления движения станка), справки об альтитуде стола ротора и иногда – к выдаче значений магнитного склонения. Контроль траектории в лучшем случае заключается в повторном расчете координат оси скважины по полученным от геофизиков значениям зенитного угла, магнитного азимута и глубины по стволу скважины. Существующая процедура позволяет только найти ошибки в расчете приращений координат, при этом к контролю определения исходных угловых параметров – зенитных углов и азимутов, от которых и зависит траектория скважины, никакого отношения не имеет.

Отсутствие непосредственного контроля замеров в скважинах со стороны маркшейдерских служб исторически сложилось по объективным технологическим причинам: изме-

рения выполнялись приборами на кабеле интервально или по секциям буровыми и геофизическими подрядчиками, значения зенитного угла и магнитного азимута, зафиксированные фотомеханическими или электронными регистраторами, коррекции не подлежали. В итоге в отрасли сложилась ситуация, когда со стороны операторов разработки, имеющих лицензии на производство маркшейдерских работ, контроль определения траектории скважин не осуществляется. А корректность пространственно-геометрических параметров скважин целиком зависит от подрядных организаций, не заинтересованных в качестве геологических модельных построений залежи, полноты извлечения УВС и экономической эффективности проекта и не имеющих лицензии на производство маркшейдерских работ.

В таких условиях решающим становится вопрос о компетенции исполнителей со стороны нефтесервисных и геофизических подрядчиков и исполнения их внутренних процедур контроля качества скважинных измерений (при их наличии). Отсутствие же реального контроля точности траекторий скважин со стороны операторов разработки месторождений УВС вряд ли можно назвать нормальным состоянием отрасли, особенно при столь высокой стоимости строительства скважин, о чем говорилось выше.

В настоящее время изменились не только приборы для измерений в скважине и технология проведения замеров, также изменилась методика выполнения расчетов траектории.

Появление беспроводных каналов связи между устьем и забоем скважины и забойных телеметрических систем (MWD), использующих магнитометры и акселерометры, привело к следующим изменениям:

- существенно повысилась точность и оперативность измерений траекторий;
- для расчета зенитного угла и магнитного азимута требуется камеральная обработка измерений, возможна коррекция внешних воздействий на замеры телесистемы;
- значительно выросла роль методов теории математической обработки геодезических измерений, используемых при контроле качества замеров в скважине и расчете неопределенности её положения;
- методы коррекции позволяют уточнять пространственное положение скважин и снижать неопределенность позиционирования более чем на 50 % даже спустя десятилетия после их строительства, при условии наличия «сырых» измерений у оператора.

Существующие методики обработки замеров MWD позволяют маркшейдерским службам контролировать их качество, выполнять коррекцию измерений, вычислять все исходные параметры, необходимые для расчета траекторий, и оценивать их неопределенность, тем самым обеспечивая реальный контроль позиционирования скважин. Наличие полноценного контроля со стороны операторов в свою очередь приведет подрядные организации к необходимости соответствия возросшим требованиям отрасли.

Тема пространственных измерений в скважине и их обработки обширная, затрагивает сопредельные области знания и не может быть подробно освещена в рамках отдельной публикации, далее будут рассмотрены только основные элементы позиционирования скважин при выполнении измерений забойными телесистемами.

К таким элементам в рамках данной публикации можно отнести:

- забойные телеметрические системы (MWD);
- нормативное обеспечение скважинных измерений;
- расчет угловых параметров и траекторий;
- геомагнитные модели, используемые в нефтегазовой отрасли;
- контроль качества измерений и неопределенность траектории;
- коррекцию измерений.

Каждый из перечисленных элементов заслуживает отдельного исследования и серии публикаций, здесь будут рассмотрены только основные их аспекты.

Забойная телеметрическая система

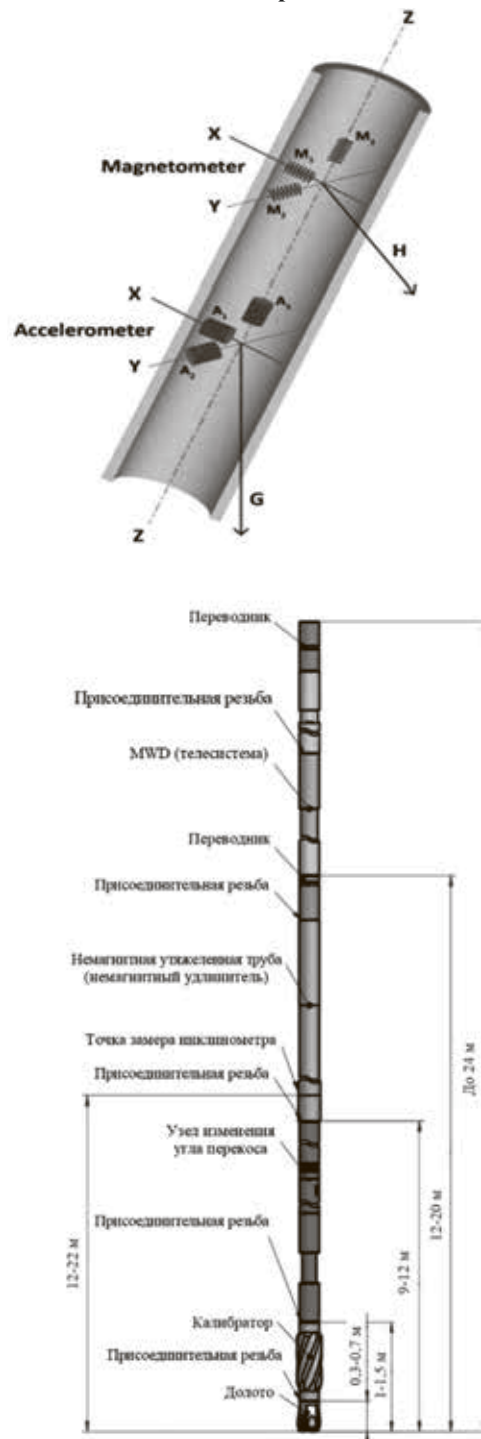


Рис. 1. Забойная телеметрическая система /
Fig. 1. Downhole telemetry system

Забойные телеметрические системы (далее – MWD, Measure while drilling – измерения во время бурения) предназначены для оперативного управления траекторией бурения скважин путем измерения гравитации и магнитного поля в процессе бурения.

В общем случае телесистема состоит из основных компонентов, которые обеспечивают первичные измерения в скважине, передачу информации на устье, обработку и предоставление результата замера полевому инженеру MWD.

Основные компоненты забойной телеметрической системы:

- забойная измерительная аппаратура;
- аппаратура на поверхности;
- оборудование канала связи;
- источник электроэнергии (для систем с электромагнитным или гидравлическим каналом связи).

Измерительная аппаратура входит в состав компоновки низа бурильной колонны (далее – КНБК), измерения выполняются в статическом режиме во время остановок для наращивания бурильной колонны.

Измерительные приборы MWD представляют собой две группы датчиков: три акселерометра (G_x , G_y , G_z) ориентированных ортогонально друг другу, для гравиметрических измерений и три магнитометра (B_x , B_y , B_z), также ориентированных взаимно ортогонально, для измерения магнитного поля. Ориентация Z-датчиков в обеих группах совпадает с осью скважины.

Акселерометры служат для определения наклона скважины относительно отвесной линии – зенитного угла (I), магнитометры – для определения направления скважины относительно направления на магнитный север – магнитного азимута (A_m).

Измерительные системы на основе магнитометров и акселерометров могут использоваться для определения траекторий при геофизических исследованиях скважин на кабеле в открытом стволе.

Глубину скважины по стволу (мера инструмента) определяют при помощи отсчетного устройства на устье скважины, контроль глубины выполняется сравнением значения с суммой длин отдельных труб, составляющих бурильную колонну.

Нормативное обеспечение скважинных измерений

В действующих «Правилах осуществления маркшейдерской деятельности» [5] отсутствуют требования к маркшейдерскому контролю определения ключевых пространственных параметров траекторий скважин: глубины, азимута и зенитного угла, отсутствует методика оценки пространственной неопределенности траекторий скважин.

Раздел 20 «Технической инструкции по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах РД 153-39.0-072-01», 2001 года [6], посвящен инклинометрии. Его анализ позволяет утверждать, что полное исполнение его требований позволит обеспечить позиционную точность траекторий в пределах точности используемых приборов и методов измерения. Однако данная инструкция не применима для замеров забойными телесистемами. К недостаткам документа можно также отнести отсутствие методики расчета неопределенности положения скважин.

За пределами РФ забойные телесистемы начали приме-

нять в конце 1970-х, роль регулятора в этой сфере взял на себя Отраслевой руководящий комитет по точности измерений стволов скважин (ISCWSA – Industry Steering Committee on Wellbore Survey Accuracy), в состав которого вошли ведущие специалисты по точности скважинных измерений из ведущих компаний индустрии. ISCWSA ведет деятельность в рамках Сообщества инженеров-нефтяников (SPE – Society of Petroleum Engineers). Руководящие документы и научные статьи размещены на сайте Комитета и ресурсе SPE OnePetro.org. И первые, и вторые признаются операторами разработки, нефтесервисными подрядчиками и производителями измерительных систем, организации как стандарты [7, 8, 10–18].

К главной, но не единственной разработке ISCWSA можно отнести «Модель ошибок ISCWSA» (Definition of the ISCWSA Error Model) [8].

В РФ отсутствуют действующие нормативные документы, устанавливающие требования для пространственных замеров забойными телесистемами в процессе бурения, и утвержденные методики оценки пространственной неопределенности скважин. В таких условиях выглядит оправданным использование стандартов ISCWSA российским нефтегазовым сектором.

Расчет исходных параметров и координат траектории

Задача расчета траектории скважины состоит в том, что на основании измерений глубины (MD), зенитного угла (I) и магнитного азимута (A_m) рассчитать координаты точек замеров в прямоугольной системе координат. Начало отсчета координат ведется от устья скважины, а глубины – от стола ротора. Для расчета зенитного угла (I) и магнитного азимута (A_m) в точках замеров по «сырым» (некорректированным) измерениям MWD необходимы замеры акселерометров – G_x , G_y , G_z и магнитометров – B_x , B_y , B_z [7].

Для определения зенитного угла достаточно только измерений акселерометров. Расчет выполняется по формуле

$$I = \cos^{-1} \left(\frac{G_z}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \right). \quad (1)$$

Для расчета магнитного азимута (румба) используются значения замеров всех шести датчиков:

$$A_m = \tan^{-1} \left(\frac{(G_x B_y - G_y B_x) \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}}{B_z (G_x^2 + G_y^2) - G_z (G_x B_x + G_y B_y)} \right). \quad (2)$$

Переход от магнитного азимута к истинному (A) выполняется по формуле

$$A = A_m + (\pm DEC), \quad (3)$$

где DEC – магнитное склонение.

Переход к дирекционным углам:

$$\alpha = A - (\pm \gamma), \quad (4)$$

где γ – сближение меридианов.

Расчет траекторий выполняют методом средних углов или минимальной кривизны, применение обоих методов описано в «Инструкции по проведению инклинометрических исследований в скважинах» 1988 года [9].

Данные геомагнитных моделей

Параметры магнитного поля необходимы для расчетов траектории скважины, контроля качества измерений магнитометров и коррекции значений.

Для этих целей используется:

- магнитное склонение (DEC);
- магнитное наклонение (DIP);
- модуль вектора индукции магнитного поля (B).

Магнитное склонение и магнитное наклонение определяют направление вектора магнитной индукции, а индукция является его силовой характеристикой.

Параметры магнитного поля получают из геомагнитных моделей, в соответствии с классификацией ISCWSA [10–12] они делятся на пять категорий:

- низкого разрешения (IGRF, WMM);
- стандартного разрешения (WMMHR);
- высокого разрешения (HDGM, BGGM);
- In-Field Referencing (IFR1) – учитывают местные магнитные аномалии;
- In-Field Referencing with Real-time Disturbance Field Correction (IFR2) – учитывают местные магнитные аномалии и внешние магнитные возмущения.

От степени разрешения модели магнитного поля Земли напрямую зависит точность позиционирования скважины. Использование моделей более высокого разрешения может значительно уменьшить неопределенность траектории.

В настоящее время в РФ недоступны модели высокого разрешения HDGM и BGGM. Отсутствие обеспечения российскими геомагнитными данными высокого разрешения – одна из наиболее актуальных проблем нефтегазового сектора.

Контроль качества измерений и неопределенность траекторий

Замеры MWD, как любые измерения, подвержены ошибкам. Измерения в скважине выполняются дистанционно, без замыкания и равномерного распределения ошибок, как это делается на поверхности или в горных выработках с доступом людей. Ошибки измерений нефтегазовой скважины накапливаются по мере ее бурения и имеют максимальные значения на забое. Возникающие ошибки могут быть значительными по отношению к геологическим целям, поэтому при бурении скважины требуется оценка ее пространственной неопределенности.

Используемая в отрасли модель ошибок ISCWSA, подробно описанная в работе Н. Williamson [13], учитывает практически все типы измерительных систем, их реакцию на различные воздействия окружающей среды и применение основных методов коррекции. Размеры области неопределенности положения забоя скважины – эллипсоида неопределенности (EOU) – следуют из точности измерительной системы и внешних условий. Модели погрешностей основаны на конкретных предположениях о точности инструмента, процедурах съемки и условиях окружающей среды. Каждая магнитная съемка должна быть связана с одной и той же моделью ошибок для проверки на контроль качества и расчетов предотвращения столкновений, в отчетах об обследовании должна быть указана модель ошибки, связанная с набором измерений. Если фактические данные исследований не соответствуют предположениям модели, оценка погрешности становится недействительной и уже нельзя считать, что цели бурения скважины достигнуты.

Использование модели ошибок без соответствующего контроля качества измерений представляет собой опасно-неполное решение. Для возможности использования модели ошибок необходимо обеспечить контроль качества входных данных и идентифицировать данные, которые не соответствуют модели.

Параметры тестирования контроля качества обычно подразделяются на одну из четырех категорий: тестирование полевых компонентов, тесты ориентации, тесты разброса измерений и тесты пространственного положения. В рамках данного исследования будет рассмотрено только тестирование полевых компонентов. Методики контроля качества измерений и выявления промахов подробно описаны в работах R. Ekseth [14, 15].

Приборы для скважинных исследований измеряют положение относительно гравитационного и магнитного поля Земли. Модель ошибок геодезического инструмента предсказывает, насколько хорошо измеренные значения поля должны совпадать с теоретическими. Соответствие данных съемки этим критериям указывает на соблюдение допущений модели точности определения зенитного угла и азимута.

Тестирование полевых компонентов заключается в сравнении данных полевых замеров с референсными значениями физических полей.

Для контроля качества замеров акселерометров используется тест на гравитационную ошибку, полное значение гравитационного поля G_t определяют по формуле

$$G_t = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} \quad (5)$$

Для контроля качества измерений магнитометров используются тесты на полное значение модуля B_t и угол магнитного наклонения DIP:

$$B_t = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (6)$$

$$\text{Dip} = \sin^{-1} \left[\frac{B_x G_x + B_y G_y + B_z G_z}{B_t G_t} \right] \quad (7)$$

Для получения референсных значений G_{ref} используют глобальные гравитационные модели, референсные значения B_{ref} и DIP_{ref} берут из геомагнитной модели.

В отрасли для указанных тестов приняты следующие пределы допуска отклонения от референсных значений:

$$G_t = G_{\text{ref}} \pm 2,5 \text{ mg};$$

$$B_t = B_{\text{ref}} \pm 300 \text{ nT};$$

$$\text{DIP} = \text{DIP}_{\text{ref}} \pm 0,45^\circ.$$

По результатам процедур контроля качества выбирается соответствующая им модель ошибок, при помощи которой выполняется расчет неопределенности пространственного положения скважины. Доверительный интервал, принятый в отрасли, соответствует нахождению каждой съемочной точки скважины внутри эллипсоида неопределенности с уверенностью 95 %, или $2,79 \sigma$ (сигма).

Основные источники ошибок и коррекция измерений

На сырые замеры акселерометров и магнитометров влияют различные ошибки. Источник ошибки – это физическое явление, влияющее на ошибку при взятии замера прибором.

Основной вклад в неопределенность положения забоя скважины вносят систематические ошибки, векторы которых суммируются от измерения к измерению.

К основным источникам ошибок измерений в скважинах относятся [13]:

- ошибки датчиков;
- магнитное влияние КНБК;
- отклонение оси прибора от оси скважины;
- неопределенность магнитного поля Земли;
- ошибки измерения глубины.

Для нивелирования указанных ошибок применяются различные методы коррекции результатов измерений. Необходимость и возможность того или иного вида коррекции определяется по результатам процедур контроля качества измерений с учетом требований к точности проводки скважины.

Ошибки датчиков компенсируются регулярными калибровками, в ходе которых определяют значения смещений значений, масштабные коэффициенты и несоосности. После калибровки должны проводиться приемочные испытания. Контроль своевременного проведения калибровок скважинных измерительных систем нефтесервисным подрядчиком – одна из функций оператора-заказчика.

Осевое магнитное влияние КНБК возникает из-за входящих в ее состав магнитных компонентов и электронной аппаратуры. Это влияние в значительной степени зависит от направления скважины, наиболее неблагоприятными являются горизонтальные участки в западном и восточном магнитном направлении. Основное магнитное влияние бурильная колонна, винтовой забойный двигатель и приборы КНБК оказывают на Z-магнитометр. Существует два метода коррекции этого влияния: метод короткого НУБТ (SCC) и многостанционный анализ (MSA).

Метод короткого НУБТ (SCC) заключается в вычислении теоретического значения Z-магнитометра, основываясь на знании полного модуля индукции магнитного поля из модели, при этом значения X- и Y-магнитометров принимаются как истинные (поперечное магнитное влияние КНБК на телесистему на порядок ниже, чем осевое). Поправку вычисляют отдельно для каждой точки съемки. У метода есть значительные ограничения: к зоне исключения метода относятся участки скважины с зенитным углом более 50° и направлениями в диапазоне $\pm 20^\circ$ от магнитного востока и запада.

Метод многостанционного анализа описан Эндрю Бруксом в 1998 году [16], учитывает измерения на нескольких станциях съемки с использованием одной КНБК. Сущность метода заключается в такой коррекции значения Z-магнитометра, при которой дисперсия измерений модуля индукции магнитного поля по всем съемочным точкам минимальна. Подбор поправки в измерения Z-магнитометров выполняется с помощью линейной регрессии по методу наименьших квадратов.

Преимущество MSA заключается в более точной коррекции измерений и лучше подходит для случаев, когда КНБК попала в зону исключения предыдущего метода. В полном развитии метод позволяет проводить оценку смещения значений всех магнитометров и их масштабных коэффициентов, а применение специальных алгоритмов позволяет выявить ошибки опорного магнитного поля [17, 18].

Кросс-аксиальная коррекция компенсирует ошибки, связанные с поперечными магнитными помехами и смещениями значений X- и Y-магнитометров и акселерометров. Поправки рассчитываются на основе «ролл-теста», который включает в себя по меньшей мере четыре измерения, выполненных на постоянной глубине и при разных углах поворота инструмента вокруг оси.

Sag-коррекция – исправление значения зенитного угла из-за несоосности между измерительным прибором и стволом скважины, вызванного прогибом КНБК под своим весом. Метод обеспечивает уменьшение неопределенности вертикального положения скважины. Для этого используется ряд алгоритмов, от простых до анализа методом конечных элементов. Простые алгоритмы определяют точки опоры КНБК, такие как стабилизаторы, и количественно оценивают изгиб между этими точками. Метод применим если ствол скважины имеет одинаковый размер и форму, а КНБК стабилизирована. Применение sag-коррекции позволяет сократить вертикальную неопределенность скважины более чем на 40 %.

Снижение неопределенности магнитного поля Земли позволяет снизить латеральную неопределенность скважины. Улучшение достигается за счет применения параметров из более точных геомагнитных моделей. Использование моделей класса IFR1 и IFR2 позволяет компенсировать ошибки местных магнитных аномалий и влияние внешних магнитных возмущений. Применение моделей IFR и коррекции MSA позволяет сократить латеральную неопределенность на 40–60 % в зависимости от направления скважины.

Коррекция измерения глубины (MD) выполняется для компенсации влияния на бурильную колонну температуры и растяжения. Коррекция применяется для снижения неопределенности по направлению движения бурильной колонны. Алгоритм коррекции основан на эмпирических данных, используют коэффициент удлинения за счет растяжения бурильной колонны под своим весом и коэффициент температурного расширения стали.

Заключение

1. Точность определения траекторий скважин оказывает влияние на корректность геологических и гидродинамических моделей месторождений. Высокая пространственная неопределенность траекторий может привести к низкой продуктивности скважин, связанной с недостижением геологических целей, а также к риску пересечений скважин, что в итоге может оказать негативное влияние на экономическую эффективность проекта и его промышленную безопасность. Для повышения точности скважин необходим реальный контроль их пространственного положения со стороны операторов разработки УВС.

2. Для реализации контроля положения траекторий необходимо обеспечить передачу информации операторам разработки от нефтесервисных и геофизических подрядчиков.

Информация, передаваемая операторам, должна включать в себя:

- данные скважинных замеров MWD (6 осей);
- параметры, использованные при проводке скважины и расчете их траекторий, включая данные магнитных и гравиметрических моделей;
- данные о процедурах контроля качества измерений;
- данные о проведенных калибровках измерительных систем;

- сведения о примененных коррекциях измерений;
- обоснования примененной модели погрешности.

Также необходим контроль за недопущением внесения изменений в «сырые» замеры MWD со стороны полевых специалистов подрядных организаций.

3. В условиях отсутствия требований регулятора к проведению замеров забойными телесистемами операторам разработки и нефтесервисным компаниям необходимо разработать собственные регламенты замеров MWD с определением требований к контролю качества измерений, методик их коррекции и критериев применения моделей ошибок.

4. Функция контроля позиционной точности скважин со стороны операторов разработки должна быть реализована

маркшейдерскими службами, на которые нормативными документами возложены обязанности:

- определения пространственно-геометрических параметров подземных сооружений;
- обеспечения соблюдения параметров проектов разработки месторождений;
- контроля за рациональной разработкой месторождений и охраной недр;
- обеспечения промышленной безопасности ведения горных работ.

5. Программа подготовки горных инженеров-маркшейдеров включает в себя набор дисциплин, необходимых для обеспечения полноценного контроля траекторий скважин и выполнения функций, перечисленных в пункте 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Никифоров С.Н. История становления и современное состояние маркшейдерского дела в отечественной и зарубежной нефтегазодобывающей промышленности. *Маркшейдерия и недропользование*. 2009;3(41). [Nikiforov S.N. History of formation and current state of surveying in domestic and foreign oil and gas producing industry. *Surveying and subsoil use*. 2009;3(41) (In Russ.)]
2. Положение о лицензировании производства маркшейдерских работ, утв. Постановлением Правительства РФ от 16.09.2020 № 1467. *Собрание законодательства Российской Федерации*. 2020;39:6047. [Regulations on licensing of surveying works, approved by the Resolution of the Government of the Russian Federation from 16.09.2020 № 1467. *Collected Legislation of the Russian Federation*. 2020;39:6047 (In Russ.)]
3. Russia's Oil Drilling Boom Proves Moscow's Resilience to Western Sanctions. *Bloomberg*. Available from: Russia's Oil Drilling Boom Proves Moscow's Resilience to Western Sanctions.
4. Специалист по контролю и управлению траекторией бурения (геонавигации) скважин: профессиональный стандарт, утв. Приказом Минтруда России от 29.06.2017 № 533н. *Официальный интернет-портал правовой информации*. [Professional standard «Specialist in control and management of drilling (geo-navigation) trajectory of wells», approved by Order of the Ministry of Labor of Russia from 29.06.2017 № 533н. *Official Internet portal of legal information* (In Russ.)]. Available from: <http://www.pravo.gov.ru>.
5. Правила осуществления маркшейдерской деятельности, утв. Приказом Ростехнадзора от 19.05.2023 № 186. *Официальный интернет-портал правовой информации*. [Rules of surveying activities, approved by the Order of Rostekhnadzor of 19.05.2023 № 186 // Official Internet-portal of legal information (In Russ.)]. Available from: <http://pravo.gov.ru>.
6. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах (РД 153-39.0-072-01), утв. Приказом Минэнерго РФ от 07.05.2001 № 134. [Technical Instruction on geophysical research and works with instruments on cable in oil and gas wells (RD 153-39.0-072-01), approved by the Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation from 07.06.2001 № 134. (In Russ.)]. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200056065>.
7. Introduction to Wellbore Positioning. Available from: Wellbore-eBook-V9.10.2017.pdf.
8. Definition of the ISCWSA Error Model Revision 5.13. Error model sub-committee. Available from: definition-of-iscwsa-error-model-v5-13.pdf.
9. Инструкция по проведению инклинометрических исследований в скважинах (дополнение к Технической инструкции по проведению геофизических исследований в скважинах), утв. Министерством геологии СССР 12.07.1988. Калинин, 1989: 14. [Instruction for conducting inclinometer surveys in boreholes (supplement to the Technical Instruction for conducting geophysical surveys in boreholes), approved by the Ministry of Geology of the USSR 12.07.1988. Kalinin, 1989: 14 (In Russ.)]
10. Five Primary Geomagnetic Reference Model Categories. Available from: five-primary-geomagnetic-reference-model-categories-rev2.pdf.
11. Maus S, Manoj CN, Poedjono B, et al. High Definition Geomagnetic Models: A New Perspective for Improved Wellbore Positioning. *The IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. San Diego, California, USA, 2012.
12. Maus S. Managing Main & Crustal Magnetic Fields and New Developments in Global Magnetic Modeling. *ISCWSA meeting 41*, London, 2015.
13. Williamson HS. Accuracy Prediction for Directional Measurement While Drilling. *SPE Drill & Compl.* 2000;15(04):221-33. DOI: 10.2118/67616-PA.
14. Ekseth R, Torkildsen T, Brooks A, et al. The Reliability Problem Related to Directional Survey Data. *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Bangkok, Thailand, 2006. DOI: 10.2118/103734-MS.
15. Ekseth R, Torkildsen T, Brooks A, et al. High Integrity Wellbore Surveys: Methods for Eliminating Gross Errors. *SPE/IADC Drilling Conference*. Amsterdam, The Netherlands, 2007. DOI: 10.2118/105558-MS.
16. Brooks A, Gurden P, Noy K. Practical Application of a Multiple-Survey Magnetic Correction Algorithm. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, 1998. DOI: 10.2118/49060-MS.
17. Nymes E, Torkildsen T, Wilson H. Minimum Requirements for Multi-Station Analysis of MWD Magnetic Directional Surveys. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition held in Manama*. Bahrain, 2009. DOI: 10.2118/125677-MS.
18. Bulychenkov K. Improving Multistation Analysis of MWD Directional Magnetic Surveys. *SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition*. Moscow, 2013. DOI: 10.2118/166865-MS.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Николаевич Бухтояров –
начальник отдела маркшейдерско-геодезических работ
ООО «Газпром нефть шельф», 191186, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: z9851275712@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Boris N. Bukhtoyarov –
Head of Surveying and Geodesy Department, Gazprom Neft
Shelf LLC. 191186, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail:
z9851275712@gmail.com

Оксана Рашитовна Старикова –

заместитель начальника отдела маркшейдерско-геодезических работ ООО «Газпром нефть шельф»,
191186, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail:
oxy3791@gmail.com

Oksana R. Starikova –

Deputy Head of the Surveying and Geodesy Department of
Gazprom Neft Shelf LLC. 191186, St. Petersburg, Russian
Federation, e-mail: oxy3791@gmail.com

Критерии авторства / Contribution:

Б. Н. Бухтояров – написание текста статьи, сбор и анализ данных, выполнение работы по систематизации материала; О. Р. Старикова – участие в создании концепции статьи, сборе и анализе данных, редактирование текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи. / B. N. Bukhtoyarov – writing the text of the article, data collection and analysis, work on systematization of the material; O. R. Starikova – participation in the creation of the concept of the article, data collection and analysis, editing the text of the article. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.04.2025

Поступила после рецензирования: 28.05.2025.

Принята к публикации: 02.06.2025.

Article info

Received: 11.04.2025

Revised: 28.05.2025.

Accepted: 02.06.2025.

К ВОПРОСУ О МЕТОДОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ КОНСТРУКЦИИ БЫСТРОВЗВОДИМЫХ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК

А. Н. Домрачев, М. Г. Коряга✉

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,

г. Новокузнецк, Российская Федерация

✉ r7080@yandex.ru

Аннотация: Приведены результаты взаимодействия ударной воздушной волны и быстро возводимых парашютных перемычек с использованием аппарата численного моделирования на основе метода конечных элементов. Установлено, что существующие системы удержания парашютных перемычек не всегда обеспечивают необходимое сопротивление для гашения ударной волны при определенных сечениях горных выработок, а также определено расположение элементов перемычек с максимальным значением критерия Ранкина. Результаты исследований использованы при разработке конструкции системы дополнительного крепления полотна перемычки к элементам анкерной крепи.

Ключевые слова: подземные горные выработки, взрыв метановоздушной смеси, ударная воздушная волна, гашения ударной волны, парашютные перемычки, моделирование, критерий Ранкина

Для цитирования: Домрачев АН, Коряга МГ. К вопросу о методологии моделирования и оценки конструкции быстро возводимых взрывоустойчивых перемычек. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):29-35. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-29-35>.

TO THE QUESTION ON METHODOLOGY OF MODELING AND EVALUATION OF THE DESIGN OF RAPIDLY ERECTABLE EXPLOSION-PROOF STOPPINGS

A. N. Domrachev, M. G. Koryaga✉

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation

✉ r7080@yandex.ru

Abstract: This article presents the study results of interaction of shock air wave and rapidly erectable stoppings using numerical modeling techniques based on the finite element method. It was established that existing holding systems of parachute stopping do not always provide the necessary resistance to dampen the shock wave at certain cross-sections of mine workings. The arrangement of the stopping elements with the maximum value of Rankine criterion was determined. The results of the studies were used to develop the design of a system for additional fastening of the stopping material to the elements of the anchor support.

Keywords: modeling, Rankine criterion, parachute stoppings, shock air wave

For citation: Domrachev AN, Koryaga MG. To the question on methodology of modeling and evaluation of the design of rapidly erectable explosion-proof stoppings. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):29-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-29-35>.

Введение

Потребность в гашении ударной воздушной волны, возникающей при взрыве метановоздушной смеси (МВС) в подземных горных выработках, является актуальной проблемой. Разработка быстро возводимых перемычек для угольных шахт ведется с 70-х годов прошлого столетия. Раз-

работка началась практически одновременно как в США, так и в СССР.

История вопроса

В 1975 году F. N. Kissell, E. D. Thimons, R. P. Vinson запатентовали устройство в основе которого лежало использование парашюта, стропы которого крепились к кровле на

болтовом соединении в одной точке [1]. Купол парашюта перекрывал сечение выработки за счет набегающей на него струи воздуха (рис. 1).

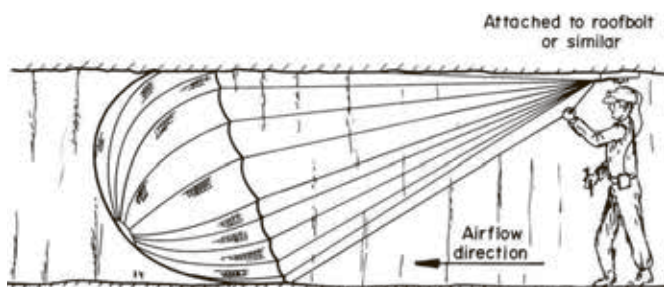


Рис. 1. Фигура 2 из патента 1975 года [1] /
Fig. 1. Figure 2 from the patent of 1975 [1]

Испытания проводились в условиях действующей шахты. Крепление строп осуществлялось за верхняк рамы крепи горной выработки (рис. 2).



Рис. 2. Фигура 3 из патента 1975 года [1] /
Fig. 2. Figure 3 from the patent of 1975 [1]

В 1976 году Edward D. Thimons, Fred N. Kissell и Питтсбургский центр исследований в области добычи полезных ископаемых и безопасности, Пенсильвания [2], предложили применить данную конструкцию для регулирования воздушных потоков в условиях шахты.

Быстроразъемные перемычки разрабатывались и испытывались для условий урановых рудников Нью-Мексико. Имея диаметр в 12 футов, они могли перекрыть почти любую горную выработку. При этом для герметизации было особо важно, чтобы периметр парашюта был больше, чем периметр изолируемой выработки (рис. 3). Испытания для быстрого изменения режима вентиляции в двух урановых рудниках в Нью-Мексико показали эффективность регулирования и быстроту установки такой перемычки, что выгодно отличало ее от деревянной или матерчатой завесы.

Такая конструкция делает перемычку менее чувствительной к воздействию воздушной ударной волны от взрыва и в случае ее сохранности позволяет быстро переустановить на другое место.

Отечественные разработки, отмеченные патентами, появляются в СССР начиная с 1979 года. Один из первых вариантов [3] конструкции снабжался центральной стропой, одним концом закрепляясь к вершине купола с внутренней его стороны, а вторым, присоединенным к общему пучку строп, закрепляемых посредством коушной шайбы, – к одному из элементов оснащения горной выработки (рис. 4).

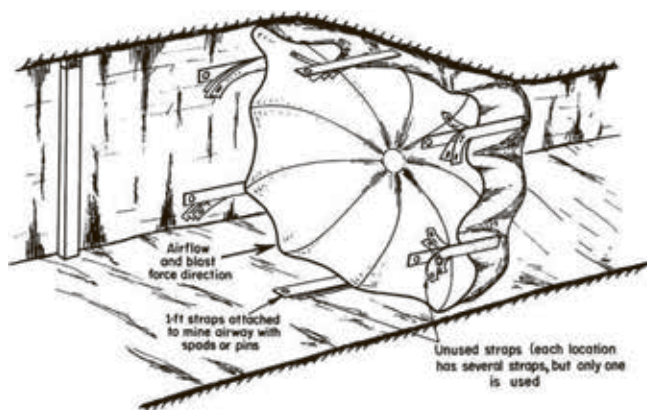


Рис. 3. Фигура 1 из патента 1976 года [2] /
Fig. 3. Figure 1 from the patent of 1976 [2]

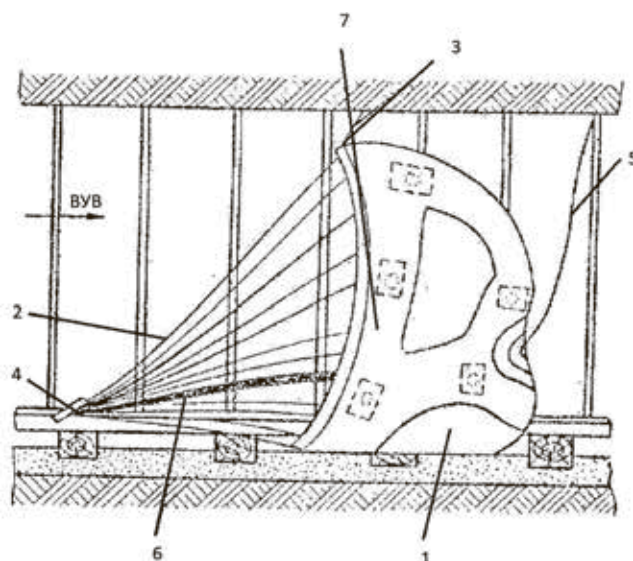


Рис. 4. Фигура 1 из патента СССР 1979 года [3]:
1 – парашютообразный купол, 2 – стропы,
3 – резиновые растяжки, 4 – коушная шайба, 5 – резиновая растяжка,
6 – центральная стропы,
7 – объемный пневмокаркас /
Fig. 4. Figure 1 from the patent of 1979 issued in USSR [3]:
1 – parachute-shaped cone, 2 – stropes,
3 – rubber stretchers, 4 – thimble washer, 5 – rubber stretcher,
6 – central strop, 7 – volumetric pneumatic frame

Элементы жесткости размещались на наружной поверхности купола, выполненного в виде объемного пневмокаркаса из воздухонепроницаемого материала. Перемычка снабжалась клапанами, установленными с внутренней стороны купола и сообщенными с внутренней полостью объемного пневмокаркаса. При этом длина центральной стропы принималась равной не менее диаметра купола, а прочность ее – равной не менее половины суммарной прочности основных строп.

Следующий вариант модификации парашютной перемычки для гашения воздушной ударной волны предложен в 1981 году [4]. Устройство крепления парашюта (рис. 5) было снабжено опорой, выполненной из вертикальных гидравлических стоек 1, горизонтальных и наклонных соединительных элементов 2. При этом коуш-строп 3 перемычки закреплялся посредством энергопоглотителя 4 на опоре симметрично относительно высоты и ширины поперечного сечения выработки. Энергопоглотитель был выполнен в виде

толстостенной полый металлической трубы с установленной на одном ее конце крышкой с отверстием и расположенных внутри нее металлического стержня с шайбой на одном ее конце и круглых деревянных бобышек; при этом шайба была выполнена в виде усеченного конуса, закрепленного на стержне посредством гайки, и направлена вершиной конуса в сторону бобышек.

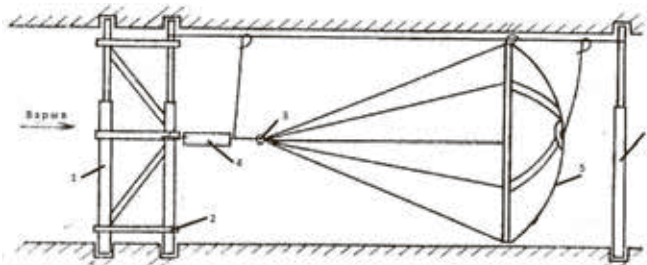


Рис. 5. Фигура 1 из патента СССР 1981 года [4] /
Fig. 5. Figure 1 from the patent of 1981 issued in the USSR [4]

Кроме того, устройство снабжалось металлической связью, расположенной в верхней части выработки, к которой были подвешены энергопоглотитель и купол парашютной перемычки 5.

Жесткость энергопоглотителя определяли через площадь поперечного сечения сминающихся внутри металлической трубы энергопоглотителя деревянных бобышек, исходя из их прочности на сжатие. За расчетное усилие, сминающее деревянные бобышки, принимали половину значения разрывного суммарного усилия строп парашютных перемычек.

Было определено, что энергопоглотитель работает эффективно при

$$\sigma_{\text{сж}} \leq \frac{R}{2F}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ – допускаемое напряжение древесины на сжатие, кгс/см²;

R – суммарное разрывное усилие строп парашютной перемычки, кгс;

F – площадь сминающейся древесины, см².

По (1) подсчитывали необходимую площадь поперечного сечения бобышек энергопоглотителя.

Время работы энергопоглотителя определялось как

$$t_3 = \frac{L}{V} > Q, \quad (2)$$

где L – длина рабочей части энергопоглотителя, см;

V – средняя скорость деформирования деревянных бобышек под действием динамической нагрузки от взрыва, см/с;

t_3 , Q – соответственно время работы энергопоглотителя и эффективное время действия ударной волны от взрыва, с.

Наиболее рациональной работа энергопоглотителя была при условии, когда $t_3 \geq 1,2 Q$.

Симметричное закрепление парашютной перемычки в горной выработке исключает неравномерное наполнение купола и неодинаковые усилия в крепежных стропях. Применение парашютных перемычек предполагалось как элемент системы регулирования вентиляции шахты.

За счет перепада давления по обе стороны перемычки купол раздувается и плотно прилегает к бортам и кровле

выработки, изолируя одну часть выработки от другой по обе стороны перемычки. Движение воздуха по выработке прекращается.

Регулирование количества воздуха, который необходимо пропускать за перемычку, осуществляют следующим образом [5]. Для подачи за перемычку необходимого количества воздуха быстросъемный фиксатор, через который пропущены стропы, перемещали по стропам в направлении купола. Стropы оттягивали края купола от поверхности горной выработки в направлении к ее оси. Благодаря этому между поверхностью горной выработки и краями купола образовывался зазор, через который проходит воздух.

Предложен и вариант [6] регулирования воздушного потока, который поднимает и расправляет тент, прижимая его по периметру выработки и перекрывая все сечение штрека. Часть воздушного потока проходит при этом через отверстие в тенте, ограниченное жестким кольцом 3, что способствует снижению динамического удара в момент открытия парашютного тента. После открытия тента это отверстие перекрывается съемным клапаном, устанавливаемым вручную. В рабочем положении перемычки отверстие парашютного тента герметично перекрыто съемным клапаном.

Возможность перенаправлять воздушный поток была реализована в конструкции [7] с парашютным тентом, снабженным вентиляционным рукавом, один конец которого сопряжен с отверстием тента, а другой выполнен регулируемым по сечению. Кроме того, с целью подачи потребного количества воздуха одновременно в нескольких заданных направлениях тент мог быть снабжен дополнительными вентиляционными рукавами, причем вентиляционные рукава выполнялись из эластичного воздухонепроницаемого материала. Вентиляционный рукав мог быть присоединен к вентиляционному трубопроводу (рис. 6).

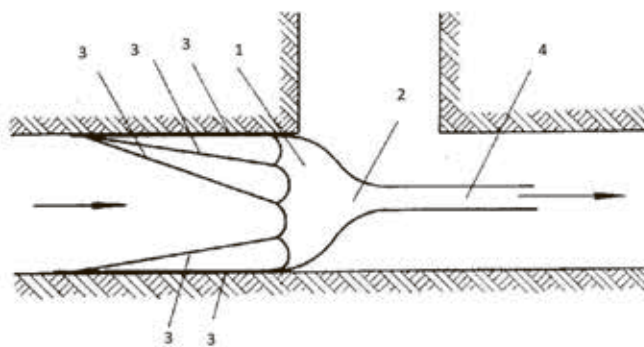


Рис. 6. Вентиляционная перемычка (фигура 1) из патента СССР 1980 года [7]: 1 – тент парашютного типа, 2 – отверстие для сопряжения с вентиляционным рукавом, 3 – присоединены средства крепления (стропы), 4 – вентиляционный рукав /

Fig. 6. Ventilation sopping, figure 1 from the patent of 1980 issued in the USSR [7]: 1 – parachute-type tilt, 2 – opening for connection with the ventilation sleeve, 3 – fastening means (strops) are attached, 4 – ventilation sleeve

Перемычка предполагалась к использованию для временной изоляции горных выработок, в частности, при ведении горноспасательных работ, а также для перераспределения воздушных потоков [8]. Закрепление осуществлялось посередине площади поперечного сечения выработки, жестко по обе стороны от купола (рис. 7).

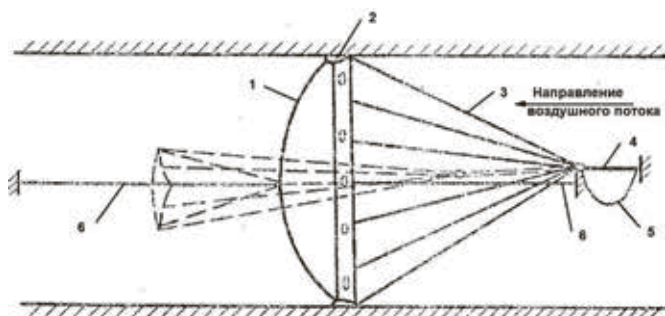


Рис. 7. Шахтная перемычка из патента СССР 1982 года [8]:

1 – парашютообразный купол, 2 – на наружной поверхности купола размещена кольцевая камера-уплотнитель, 3 – крепежные стропы, 4 – упругие резиновые амортизаторы, 5 – страховочный фал – ограничитель хода амортизатора, 6 – центральные стропы /

Fig. 7. Mine stopping from the patent of 1982 issued in the USSR [8]:

1 – parachute-shaped cone, 2 – an annular sealing chamber is located on the outer surface of the cone, 3 – fastening strops, 4 – elastic rubber shock absorbers, 5 – safety lanyard limiting the shock absorber travel, 6 – central strops

С целью тушения пожаров в подземных горных выработках запатентовано устройство [9] для безопасности и сокращения длительности работ путем предотвращения скопления горючих газов и разрушающего воздействия вентиляционной струи на пенный поток (рис. 8).

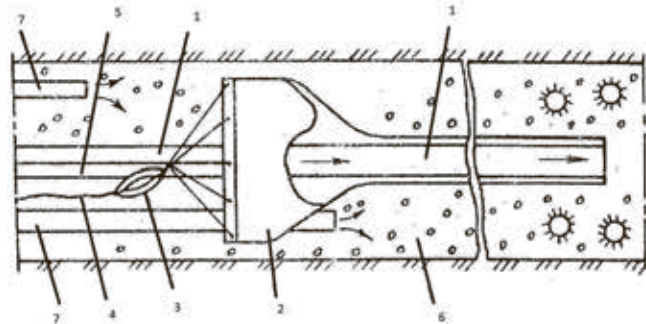


Рис. 8. Устройство для безопасности и сокращения длительности работ по ликвидации пожаров в шахте [9]: 1 – воздуховод, 2 – парашютный купол перемычки, 3 – петли, 4 – закрепленные в горной выработке фалы, 5 – стягивающий шнур, 6 – пенная пробка, 7 – трубопровод /

Fig. 8. Device for safety and reduction of time needed to extinguish fires

in mines [9]: 1 – air duct, 2 – parachute cone of the stopping, 3 – loops, 4 – halyards fixed in the mine workings, 5 – tightening cord, 6 – foam plug, 7 – pipeline

Использование изобретения позволяет:

- тушить пожар пеной в газовых шахтах без нарушения проветривания;
- изолировать полностью или частично очаги пожара, снижая тем самым активность горения и интенсивность распространения пожарных газов по горным выработкам;
- эффективно и экономично использовать для тушения пожара пенообразующий раствор за счет тщательной локальной обработки пеной всей горящей поверхности выработок и предохранения пенной пробки от разрушающего воздействия вентиляционной струи;
- эффективно тушить очаги пожара посредством одновременного воздействия на них пеной, огнегасящим порошком и инертными газами;
- осуществлять экстренное перераспределение вентиляционных потоков при авариях в шахтах, связанных с разру-

шением вентиляционных сооружений, иными словами, производить вентиляционные маневры.

Для регулирования расхода воздуха [10] в подземных выработках шахт за счет изменения формы и размеров исполнительного органа и применения ручного привода была предложена регулируемая форма парашютной перемычки.

Использование шахтного регулятора расхода воздуха на предприятиях горнодобывающих отраслей позволит с минимальными материальными и трудовыми затратами обеспечить оперативное управление вентиляционными потоками, повысить эффективность проветривания забоев и безопасность ведения горных работ, улучшить санитарно-гигиенические условия труда горнорабочих.

Для улучшения санитарно-гигиенических условий труда за счет поддержания в выработке заданного расхода воздуха в 1982 году предложена перемычка [11], состоящая из двух куполов разного размера. Вентиляционная перемычка предназначена для улучшения санитарно-гигиенических условий труда за счет поддержания в выработке заданного расхода воздуха.

Предполагалось, что при увеличении скорости движения воздушного потока напор его на дополнительный купол увеличивается, растягивая при этом резиновую растяжку, и перемещает дополнительный купол внутри вентиляционного рукава, тем самым уменьшая проходное сечение для струи воздуха. При дальнейшем увеличении скорости воздушного потока напор его на дополнительный купол будет увеличиваться и перемещать его в сторону свободного конца вентиляционного рукава.

При этом считалось, что уменьшение скорости движения воздушного потока и сжатие резиновой растяжки перемещает дополнительный купол в противоположную сторону, что приводит к увеличению площади сечения в вентиляционном рукаве для прохода воздуха.

Вариант конструкции для перераспределения воздуха в горных выработках и укрытия людей при подземных авариях [12] с возможностью перемещения перемычки по горной выработке отображен на рисунке 9.

Способ локализации энергии взрывной волны [13], включающий возведение в сечении горной выработки заслонов для снижения энергии взрывной волны, установки заслона в основной горной выработке путем расширения и проходки по боковым породам обводной выработки, в которой размещают дополнительные средства локализации энергии взрывной волны и активного гашения фронта пламени, показан на рисунке 9.

В настоящее время на вооружении ВГСЧ состоит комплект противовзрывной быстровозводимый (КПБ). Возведение КПБ (парашютной перемычки) в выработке в процессе ведения горноспасательных работ выполняется отделением ВГСЧ за 3–5 минут. На сегодняшний день это единственное быстровозводимое средство гашения ударной волны, применяемое при скоростях воздушного потока от 0,5 до 12 м/с и перепадах давления от 7 до 2 500 Па [14]. Срыв КПБ с креплений происходит при превышении избыточного давления ударной волны 0,05 МПа.

При избыточном давлении в набегающей ударной волне менее 20 кПа при перекрытии 70 % сечения выработки, рекомендованном в [15], коэффициент затухания (рис. 10) больше 0,95.

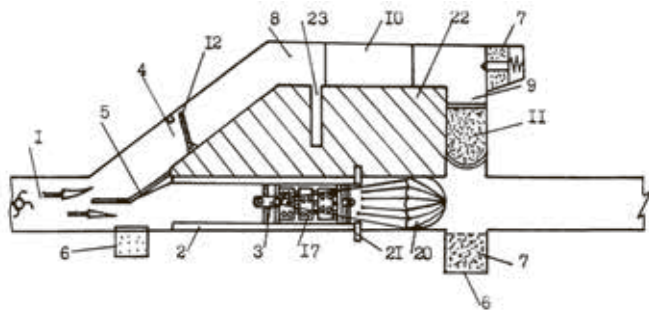


Рис. 9. Устройство для локализации энергии взрывной волны [13]:

- 1 – основная выработка; 2 – раскрепленные направляющие; 3 – заслон под кровлей; 4 – вход к обводной выработке (ловушка); 5 – отбойник потока ударной волны; 6 – ниша; 7 – огнетушащее средство; 8 – параллельная часть обводной выработки; 9 – сбойка; 10 и 11 – заслоны; 12 – перекрывающее устройство; 13 и 14 – передняя и задняя каретки заслонов; 15 – цепи; 17 – щитки со встроенными кассетами с газогенерирующими устройствами; 19 – коуш; 20 – парашютная перемычка; 21 – упоры; 22 – целик из породы; 23 – скважины с дополнительными огнетушащими устройствами /
- Fig. 9. Device for localizing the energy of explosion wave [13]: 1 – main working; 2 – unfastened guides; 3 – barrier under the roof; 4 – entrance to a bypass working (trap); 5 – shock wave flow stop; 6 – niche; 7 – fire extinguishing agent; 8 – parallel section of the bypass working; 9 – break; 10 and 11 – barriers; 12 – shut-off device; 13 and 14 – front and rear carriages of barriers; 15 – chains; 17 – shields with built-in cassettes with gas-generating devices; 19 – thimble; 20 – parachute stopping; 21 – stops; 22 – rock pillar; 23 – boreholes with additional fire extinguishing devices

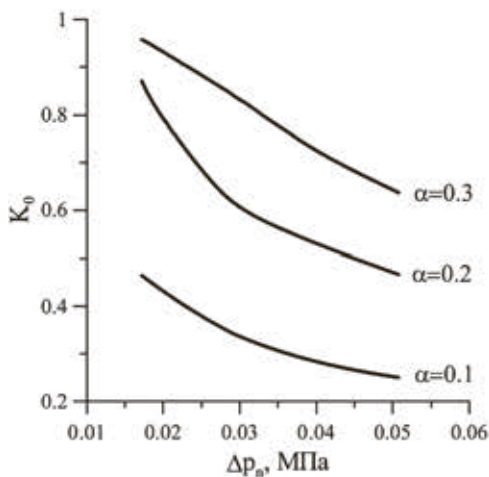


Рис. 10. Коэффициент затухания ударной волны при прохождении через комплект противовзрывной быстровозводимый [16] /

Fig. 10. Attenuation coefficient of a shock wave passing through a rapidly erectable anti-explosion package (REAP) [16]

Изменение избыточного давления в прошедшей УВ в этом случае составляет всего 5 %. Это указывает на то, что для понижения избыточного давления до величины 6 кПа, являющегося предельным по воздействию на человека, использование КПБ с рекомендованным процентом перекрытия проходного сечения в 70 % является неэффективным [16].

При увеличении количества КПБ (рис. 11) с рекомендованным процентом перекрытия проходного сечения в 70 % практически не изменяет интенсивность УВ, прошедшей за места установки КПБ.

Для понижения избыточного давления во фронте УВ более эффективно увеличивать долю перекрытия поперечного сечения выработки, чем устанавливать дополнительные КПБ.

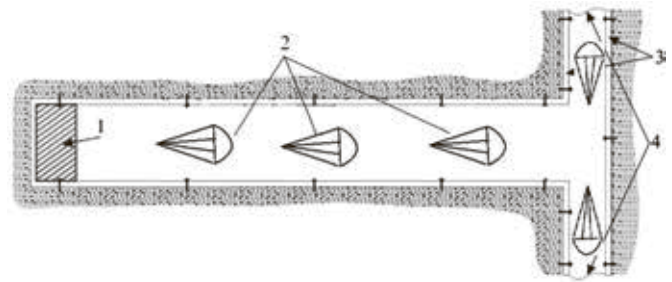


Рис. 11. Схема расположения КПБ в выработке [16]: 1 – зона взрыва метана, 2 – комплект противовзрывной быстровозводимый, 3 – бок выработки, 4 – действующая сквозная выработка /

Fig. 11. REAP layout in the working [16]: 1 – methane explosion zone, 2 – control room, 3 – gallery wall, 4 – active through working

Для моделирования геометрии перемычек парашютного типа (типа КПБ) предлагается использование геометрической модели, приведенной на рисунке 12 (см. цв. вклейку на стр. 49).

Модель основана на трапециевидном сечении выработки [17] и адаптируется как к размерам ее поперечного сечения, так и к особенностям конструкции перемычки [18, 19].

Модель допускает различные варианты закрепления перемычки – как равномерно по периметру (рис. 12), так и только в отдельных точках (рис. 13) (см. цв. вклейку на стр. 49). Любой из этих подходов может быть легко реализован выбором заранее сформированных наборов точек модели при задании граничных условий. В качестве исходного материала был принят полиамид (polyamide 66), параметры которого соответствуют парашютному шелку.

Для исследования и оценки модели были выполнены расчеты.

На основе выполненных расчетов сделан анализ изменения максимального значения критерия Ранкина в зависимости от сечения выработки. Результаты расчета приведены на рисунке 14 (см. цв. вклейку на стр. 50).

В продолжение анализа была выполнена локализация точек с максимальным значением критерия Ранкина для различных сечений в диапазоне изменения избыточного давления 0,005–0,03 МПа.

Результаты локализации приведены на рисунке 15 (см. цв. вклейку на стр. 50).

На основании расположения точек с максимальным значением критерия Ранкина разработаны предложения по конструкции системы дополнительного крепления полотна перемычки за элементы анкерной крепи (рис. 16) (см. цв. вклейку на стр. 50).

Выводы

Подводя итоги, можно констатировать, что выполненная работа характеризуется следующими основными результатами.

1. Разработана методика и масштабируемая геометрическая основа для быстрого формирования моделей парашютных перемычек различной конструкции для различных сечений горных выработок. Дополнительно сформированы типовые граничные условия и выбран (типовой) материал, наиболее близкий к реально используемому при производстве перемычки.

2. Выполнено моделирование для различных (в том числе

перспективных) моделей парашютных перемычек в широком диапазоне избыточных давлений и поперечных сечений горных выработок.

3. Определены зоны усиления конструкции перемычки как при установке, так и при разработке новых перспективных моделей.

4. Определена область применения и намечены направления развития данной конструкции перемычек с учетом дополнительных возможностей, которые могут быть получены при использовании новых конструктивных материалов и изменении способа фиксации перемычки в горной выработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Kissell FN, Thimons ED, Vinson RP. The parachute stopping – preliminary experiments. Pittsburgh Mining and Safety Research Center, Pittsburgh, Pa. Bureau of Mines Noncoal Ventilation Program Technical Progress Report 90 April 1975. U.S. Department of the interior.
2. Thimons ED, Kissell FN. Quick-fix blowout stoppings for hardrock mines. Pittsburgh Mining and Safety Research Center, Pittsburgh, Pa. Bureau of Mines Noncoal Ventilation Program Technical Progress Report 100 October 1976. U.S. Department of the interior.
3. Плотников ВМ, Чеховских АМ, Абинов АГ, Митрофанов ВП, Рогов МГ. Шахтная перемычка для гашения энергии воздушной ударной волны в горной выработке. Патент SU № 781370. 1980, Бюлл. № 43. [Plotnikov VM, Chekhovskikh AM, Abinov AG, Mitrofanov VP, Rogov MG. Mine stopping for damping energy of an air shock wave in the mine working. Patent SU No. 781370. 1980 Bulletin No. 43. (In Russ.)]
4. Плотников ВМ. Устройство для гашения энергии ударной волны взрыва в горной выработке. Патент SU 976104 A1. 1982, Бюлл. № 43. [Plotnikov VM. Device for damping the shock wave energy of explosion in a mine working. Patent SU 976104 A1. 1982, Bulletin No. 43. (In Russ.)]
5. Стаханов АН, Шепелев СФ, Вазилло ЕН, Селиванов ГИ, Мун ВМ, Вязниковцев ЕВ, Жанбатыров АА. Вентиляционная перемычка. Патент SU 977818. 1982, Бюлл. № 44. [Stakhanov AN, Shepelev SF, Vazillo EN, Selivanov GI, Mun VM, Vyaznikovtsev EV, Zhanbatyrov AA. Ventilation stopping. Patent SU 977818. 1982, Bulletin No. 44. (In Russ.)]
6. Анцыгин ЮГ, Макаров ИИ, Болбат ИЕ. Вентиляционная перемычка парашютного типа. Патент SU 898094. 1982, Бюлл. № 2. [Antsygin YuG, Makarov II, Bolbat IE. Parachute-type ventilation stopping. Patent SU 898094. 1982, Bulletin No. 2. (In Russ.)]
7. Стаханов АН, Шепелев СФ, Селиванов ГИ, Мун ВМ, Вязниковцев ЕВ, Жанбатыров АА. Вентиляционная перемычка. Патент SU 905491. 1982, Бюлл. № 6. [Stakhanov AN, Shepelev SF, Selivanov GI, Mun VM, Vyaznikovtsev EV, Zhanbatyrov AA. Ventilation stopping. Patent SU 905491. 1982, Bulletin No. 6. (In Russ.)]
8. Плотников ВМ. Шахтная перемычка. Патент SU 1090885. 1984, Бюлл. № 17. [Plotnikov VM. Shaft bulkhead. Patent SU 1090885. 1984, Bulletin No. 17. (In Russ.)]
9. Привалов НИ, Болбат ИЕ, Крупка АА. Устройство для тушения пожаров. Патент SU 1660707. 1991, Бюлл. № 25. [Privalov NI, Bolbat IE, Krupka AA. Fire extinguishing device. Patent SU 1660707. 1991, Bulletin No. 25. (In Russ.)]
10. Бойко ВА, Анцырин ЮГ, Ищенко АС, Шибка НВ, Литвиненко АА. Шахтный регулятор расхода воздуха. Патент SU 1776813. 1992, Бюлл. № 43. [Boyko VA, Antsyryn YuG, Ishchenko AS, Shibka NV, Litvinenko AA. Mine air flow regulator. Patent SU 1776813. 1992, Bulletin No. 43. (In Russ.)]
11. Стаханов АН, Шепелев СФ, Жанбатыров АА, Селиванов ГИ, Мун ВМ, Ким КА. Вентиляционная перемычка. Патент SU 1084460. 1984, Бюлл. № 13. [Stakhanov AN, Shepelev SF, Zhanbatyrov AA, Selivanov GI, Mun VM, Kim KA. Ventilation stopping. Patent SU 1084460. 1984, Bull. No 13. (In Russ.)]
12. Привалов НИ, Сухоруков ВП, Чистюхин ВВ, Кузнецов ВВ, Бондарев НА. Парашютная вентиляционная перемычка. Патент SU 1652611. 1991, Бюлл. № 20. [Privalov NI, Sukhorukov VP, Chistyukhin VV, Kuznetsov VV, Bondarev NA. Parachute ventilation stopping. Patent SU 1652611. 1991, Bulletin No. 20. (In Russ.)]
13. Чуприков АЕ, Гуттер АА. Способ локализации энергии взрывной волны и устройство для его осуществления. Патент RU 2174602. 2001, Бюлл. № 28. [Chuprykov AE, Gutter AA. Method of localizing the energy of explosion wave and a device for its implementation. Patent RU 2174602. 2001, Bulletin No. 28 (In Russ.)]
14. Об организации работы по тактической подготовке оперативного состава ФАУ «ВГСЧ в строительстве» при ведении горноспасательных работ: Приказ ФАУ «ВГСЧ в строительстве» от 05.05.2023 № 199-78. [Order of the Federal Autonomous Institution «Miliarized Mine Rescue Unit in Construction» dated 05.05.2023 No. 199-78 “On the organization of work on tactical training of the operational staff of the Federal Autonomous Institution «Miliarized Mine Rescue Unit in Construction» when conducting mine rescue operations» (In Russ.)]. URL: <https://uvgsch.organizations.mchs.gov.ru/deyatelnost/normativnaya-dokumentaciya>.
15. Комплект противовзрывного быстровозводимый (КПБ): Инструкция по эксплуатации КПБ. Караганда, 1982: 63. [Rapidly erectable anti-explosion package (REAP). Operating instructions for REAP. All-Russian Research Institute of Mine Rescue (VNIIGD). Karaganda, 1982: 63 (In Russ.)]
16. Лукашов ОЮ, Крайнов АЮ, Оберемок АА. Определение эффективности использования парашютных перемычек при ликвидации аварии, осложнённой возможностью повторного взрыва. *Вестник НЦ ВостНИИ*. 2024;2:33-9. [Lukashov OYu, Kraynov AYU, Oberemok AA. Determining the efficiency of using parachute stoppings in the liquidation of an accident complicated by the possibility of a repeated explosion. *Bulletin of the Scientific Center of the Eastern Research Institute*. 2024;2:33-9. (In Russ.)]
17. Игишев ВГ, Син СА. Современное состояние проблемы борьбы с эндогенными пожарами в шахтах Кузбасса. *Уголь*. 2012;7:36-41. [Igishev VG, Sin SA. Current state of the problem of combating endogenous fires in Kuzbass mines. *Coal*. 2012;7:36-41 (In Russ.)]
18. Смышляев СА, Легаев ВР, Домрачев АН. Численное моделирование взаимодействия ударной воздушной волны с шахтными перемычками при использовании различных средств усиления. *Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ*. 2015;7:189-95. [Smyshlyayev SA, Legaev VR, Domrachev AN. Numerical modeling of the interaction of an air shock wave with mine stoppings using various reinforcement means. *Mining information and analytical bulletin of MSMU*. 2015;7:189-95. (In Russ.)]
19. Домрачев АН, Криволапов ВГ, Говорухин ЮМ и др. Методология выбора и обоснования параметров шахтной перемычки. *Неделя горняка – 2015: Сб. науч. тр.* 2015: 141-50. [Domrachev AN, Krivolapov VG, Govorukhin YuM, et al. Methodology for the selection and justification of a mine stopping reinforcement. *Miners Week*. 2015: 141-50. (In Russ.)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Николаевич Домрачев – доктор технических наук, профессор кафедры геотехнологии Института горного дела и геосистем, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», 654007, г. Новокузнецк, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0002-5823-3117>, e-mail: aleksejdomrachev21@gmail.com

Михаил Георгиевич Коряга – кандидат технических наук, доцент кафедры геотехнологии Института горного дела и геосистем, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», 654007, г. Новокузнецк, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0008-9074-069X>, E-mail: r7080@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Aleksey N. Domrachev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Geotechnology, Institute of Mining and Geosystems, Siberian State Industrial University, 654007, Novokuznetsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-5823-3117>, e-mail: aleksejdomrachev21@gmail.com

Mikhail G. Koryaga – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Geotechnology, Institute of Mining and Geosystems, Siberian State Industrial University, 654007, Novokuznetsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0008-9074-069X>, e-mail: r7080@yandex.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.03.2025.

Поступила после рецензирования: 12.05.2025.

Принята к публикации: 22.05.2025.

Article info

Received: 10.03.2025.

Revised: 12.05.2025.

Accepted: 22.05.2025.

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ДЕПРЕССИИ НА ПЛАСТ ОБВОДНЕННЫХ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ГАЗОТДАЧИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ПОЗДНЕЙ СТАДИИ РАЗРАБОТКИ

В. Н. Сокотушенко^{1✉}, Е. А. Евстафеев², Х. А. А. С. Аль-Кадри¹

¹РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

²Филиал РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, г. Ташкент, Республика Узбекистан

✉ sokotushenko@mail.ru

Аннотация: Представлена новая методика расчета оптимальной депрессии на пласт при эксплуатации обводненных газовых скважин на месторождениях, находящихся на поздней стадии разработки. Предлагаемый подход включает комплексный учет различных критериев технологического режима эксплуатации, что позволяет определить допустимый диапазон депрессий на пласт. Оптимальное значение депрессии определяется на основе сравнительного анализа основных технологических показателей разработки, полученных в результате гидродинамического моделирования различных сценариев. Методика апробирована на примере шести обводненных газовых скважин месторождения, характеризующегося высоким содержанием коррозионно-активных компонентов в валанжинских отложениях. Результаты показывают, что применение оптимального диапазона депрессий способствует увеличению газоотдачи, снижению эксплуатационных рисков и минимизации коррозионного износа оборудования. Работа подчеркивает важность поддержания стабильного режима течения, что помогает избежать образования жидкостных пробок и максимально увеличить годовую добычу газа. Предложенный подход обеспечивает эффективное и безопасное освоение месторождений на поздних стадиях разработки, продлевая срок их эксплуатации и повышая коэффициент извлечения.

Ключевые слова: скважина, технологический режим, депрессия на пласт, коррозионно-активные компоненты, критерий оптимальности, обводнение, скорость газа, показатели разработки, приближенная математическая модель, варианты разработки

Для цитирования: Сокотушенко В.Н., Евстафеев Е.А., Аль-Кадри Х.А.А.С. Обоснование рациональной депрессии на пласт обводненных газовых скважин с целью повышения газоотдачи месторождения на поздней стадии разработки. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):36-41. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-36-41>.

JUSTIFICATION FOR THE RATIONAL DEPRESSION ON THE RESERVOIR OF WATERED GAS WELLS TO ENHANCE GAS RECOVERY OF THE FIELD AT THE LATE STAGE OF DEVELOPMENT

V. N. Sokotushenko^{1✉}, E. A. Evstafeev², K. A. A. S. Al-Qadri¹

¹Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkina, Moscow, Russian Federation

²Branch of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkin, Tashkent, Republic of Uzbekistan

✉ sokotushenko@mail.ru

Abstract: The article presents a new method for calculating rational depression on the reservoir during the operation of flooded gas wells at fields at a late stage of development. The proposed approach combines multiple criteria for operational regimes, establishing an acceptable range of reservoir depressions. The optimal depression value is then determined through comparative analysis of key technological performance indicators derived from hydrodynamic modeling of various development scenarios. The methodology was validated on six watered gas wells in a field characterized by a high content of corrosive components in Valanginian deposits. Results

demonstrate that applying the optimal depression range enhances gas recovery, mitigates operational risks, and minimizes equipment corrosion. The study emphasizes the significance of maintaining a stable flow regime to prevent issues such as liquid plugs while maximizing annual gas production. This approach contributes to the efficient and safe exploitation of gas reservoirs at advanced stages of depletion, extending field life and improving recovery rates.

Keywords: Well, technological mode, reservoir drawdown, corrosive components, optimality criterion, water cut, gas velocity, development indicators, approximate mathematical model, development options

For citation: Sokotuschenko VN, Evstafeev EA, Al-Qadi Kaas. Justification for the rational depression on the reservoir of watered gas wells to enhance gas recovery of the field at the late stage of development. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):36-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-36-41>.

Введение

Многие месторождения с природным газом Советского Союза и стран дальнего зарубежья в настоящее время находятся на поздней стадии развития. Как это обычно бывает, такого рода месторождения относятся к сенноманским или валанжинским отложениям и характеризуются сложной структурой компонентов пластового газа, имеющим коррозионно-активные элементы.

Кроме этого, многие скважины из их резерва являются обводненными по многим технологическим и геологическим причинам. Вследствие некоторых политических, социальных и экономических причин, вынужденных поддерживать высокий годовой отбор природного газа на данных месторождениях, имеют место нарушения технологического режима эксплуатации газовых скважин.

Цель данной работы: разработка методики расчета рациональной депрессии на пласт, при которой возможна безаварийная эксплуатация обводненных газовых скважин месторождения, находящегося на поздней стадии разработки.

Методика заключается в комплексном учете следующих требований к безаварийной эксплуатации обводненных скважин:

- обеспечения сохранности устьевого оборудования и на-сосо-компрессорных труб от коррозионного износа;
- минимизации угрозы самозадавливания скважин;
- поддержания стабильного функционирования системы сбора и промысловой подготовки скважинной продукции.

Задачи работы: обоснование эффективного технологического режима эксплуатации скважин, который бы учитывал все геолого-технические ограничения и обеспечивал максимизацию годовых отборов газа.

Результаты работы

Задача формулируется следующим образом.

Пусть имеется N обводненных добывающих скважин на разрабатываемом газоконденсатном месторождении. Необходимо определить такую депрессию ΔP , при которой будет обеспечена максимальная годовая добыча газа при выполнении соответствующих геолого-технологических ограничений на эксплуатацию скважин в условиях обводнения и наличия коррозионно-активных компонентов в составе добываемого газа.

Математическая запись поставленной задачи выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{год}}(\Delta P) \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\begin{cases} \vartheta_y \leq \vartheta_{y \max} \\ \vartheta_z \geq \vartheta_{z \min} \\ P_y \geq P_{y \min} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta P_{\min} < \Delta P_{\max}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{год}}(\Delta P)$ – отбор газа в год на месторождении рассматриваемых скважин, млн м^3 ;

ϑ_y – скорость потока газа на устье скважины, м/с ;

$\vartheta_{y \max}$ – максимально допустимая скорость потока газа на устье скважины, м/с ;

ϑ_z – скорость потока газа на заборе скважины, м/с ;

$\vartheta_{z \min}$ – минимально требуемая скорость потока газа на устье скважины, м/с ;

P_y – давление на устье скважины, МПа;

$P_{y \min}$ – минимально допустимое устьевое давление на устье, соответствующее максимально допустимой скорости потока газа на устье скважины, МПа;

$\Delta P_{\min}$ – минимально необходимая депрессия для выноса жидкости и механических примесей с забоя обводненных скважин, МПа;

$\Delta P_{\max}$ – максимально допустимая депрессия, при которой не происходит срыв ингибиторной пленки на устье скважины и абразивный износ оборудования, МПа.

Выражение (1) представляет собой критерий оптимальности, характеризующий условие максимизации годовой добычи газа на месторождении при поддержании на рассматриваемых скважинах оптимальной депрессии ΔP .

Зависимость годовых отборов газа от дебита скважины, пропорционального депрессии, выражается следующей формулой [1]

$$Q_{\text{год}}(\Delta P) = \frac{365 \cdot K_z \cdot q(\Delta P)}{K_p}, \quad (4)$$

где K_z – коэффициент эксплуатации скважины;

K_p – коэффициент резерва скважины;

$q(\Delta P)$ – среднесуточный дебит скважины, тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$, рассчитываемый по формуле

$$(\Delta P) = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B\Delta P_{\text{пл}} - \Delta P}}{2B} \quad (5)$$

Здесь A и B – коэффициенты фильтрационного сопротивления скважины, определяемые в результате интерпретации газогидродинамических исследований скважин на стационарных режимах фильтрации, $\frac{\text{МПа}^2 \cdot \text{сут}}{\text{тыс. м}^3}$ и $\left(\frac{\text{МПа} \cdot \text{сут}}{\text{тыс. м}^3}\right)^2$;

$P_{\text{пл}}$ – текущее средневзвешенное пластовое давление в месторождении, МПа.

Система неравенств (2) представляет собой набор стандартных критериев технологического режима эксплуатации скважин, описанных в [2].

Для большинства месторождений природного газа на основании проведенных исследований зависимостей ско-

рости коррозии стали от скорости потока газа $\vartheta_{y \max} = 11 \text{ м/с}$ [3].

Для обеспечения гарантированного поднятия жидкости и механических элементов с забоя обводненной скважины минимальная скорость потока газа на ее забое $\vartheta_{z \min}$ должна не менее чем на 25–30 % превышать критическую скорость, рассчитываемую по формуле [1]

$$\vartheta_{\text{кр.з.}} = \frac{1,604 \cdot (67 - 0,45 \cdot (P_{\text{пл}} - \Delta P_{\text{min}}))^{0,25}}{(0,45 \cdot (P_{\text{пл}} - \Delta P_{\text{min}}))^{0,5}} \quad (6)$$

Так как значение устьевого давления скважины зависит от ее дебита, а значит и от скорости потока на устье, то необходимо поддерживать его допустимую величину, большую, чем минимально допустимое, рассчитываемое по формуле [2]

$$P_{y \min} = \frac{-A\varphi\vartheta_{y \max} + \sqrt{(A\varphi\vartheta_{y \max})^2 + 4[B\varphi^2\vartheta_{y \max}^2 + \omega(\vartheta_{y \max})] \cdot P_{\text{пл}}^2}}{2[B\varphi^2\vartheta_{y \max}^2 + \omega(\vartheta_{y \max})]}; \quad (7)$$

$$\omega(\vartheta_{y \max}) = e^{2S} + \theta\varphi^2\vartheta_{y \max}^2; \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{67,86d_{\text{нкт}}^2}{P_{\text{ст}}}, \quad (9)$$

где S и θ – параметры, характеризующие потери энергии потока газа за счет соответственно действия гравитационных сил и наличия гидравлических сопротивлений в стволе скважины [4];

$d_{\text{нкт}}$ – диаметр насосно-компрессорных труб, спущенных в скважину, мм;

$P_{\text{ст}}$ – давление в стандартных условиях, МПа.

Выражение (3) представляет собой условие существования допустимых диапазонов по депрессиям на скважинах. При этом нижняя граница данного диапазона – минимально необходимая депрессия на пласт рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\min} = P_{\text{пл}} - \sqrt{P_{\text{пл}}^2 - Aq_{\min} - Bq_{\min}^2}, \quad (10)$$

где $q_{\min}$ – минимально необходимый дебит для выноса с забоя скважины жидкости и механических примесей, тыс. м³/сут, рассчитываемый по формуле [5]

$$q_{\min} = \frac{\pi d_{\text{нкт}}^2}{4} \cdot 86,4 \cdot \vartheta_{z \min} \cdot \frac{T_{\text{ст}} \cdot P_{\text{з}}}{T_{\text{з}} \cdot P_{\text{ст}} \cdot Z_{\text{з}}}, \quad (11)$$

здесь $T_{\text{ст}}$ – температура в стандартных условиях, К;

$P_{\text{з}}$ – давление на забое скважины, МПа;

$Z_{\text{з}}$ – коэффициент сверхсжимаемости газа на забое скважины, исходя из кубического уравнения Пенга – Робинсона [5].

Верхняя точка данного диапазона – максимально разрешенная депрессия на пласт рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\max} = P_{\text{пл}} - P_{y \min} \sqrt{\omega(\vartheta_{y \max})}. \quad (12)$$

Таким образом, решая задачу (1) – (3), можно получить диапазон допустимых депрессий на пласт каждой скважины, из которого потом путем непосредственного расчета и выбирается оптимальное значение депрессии на пласт ΔP .

Для оценки эффективности применения предлагаемой

методики необходимо спрогнозировать динамику основных показателей разработки месторождения. Применяется приближенная математическая модель разработки месторождения на истощении при проявлении газового режима, состоящая из набора следующих уравнений [6]:

1. Уравнение материального баланса

$$\frac{P_{\text{пл}}(t)}{Z(P_{\text{пл}}(t), T_{\text{пл}})} = \frac{P_{\text{пл}}(0)}{Z(P_{\text{пл}}(0), T_{\text{пл}})} \left(1 - \frac{Q_{\text{доб.т}}}{Q_{\text{зап.газ}}} \right), \quad (13)$$

где $P_{\text{пл}}(t)$ – средневзвешенное пластовое давление в залежи на t -й год разработки, МПа;

$P_{\text{пл}}(0)$ – начальное средневзвешенное пластовое давление в залежи, МПа;

$Z(P_{\text{пл}}(t), T_{\text{пл}})$ – коэффициент сверхсжимаемости газа на t -й год разработки;

$Z(P_{\text{пл}}(0), T_{\text{пл}})$ – коэффициент сверхсжимаемости газа на начало разработки;

$Q_{\text{доб.т}}$ – накопленная добыча газа на t -й год разработки, млн м³;

$Q_{\text{зап.газ}}$ – запасы газа в залежи, млн м³.

2. Уравнение притока газа к добывающей скважине:

$$P_{\text{пл}}(t)^2 - P_{\text{з}}(t)^2 = A(t)q(t) + B(t)(q(t))^2 \quad (14)$$

где $P_{\text{з}}(t)$ – забойное давление добывающей скважины, рассчитываемое как разность текущего пластового давления и оптимальной депрессии на пласт, МПа;

$q(t)$ – среднесуточный дебит скважины на t -й год разработки, тыс. м³/сут.

3. Критерий технологического режима работы скважин – режим постоянной депрессии на пласт

$$\Delta P = \text{const} \quad (15)$$

4. Уравнение связи годовой добычи газа и числа скважин

$$Q_{\text{годт}} = \frac{(q(t) + q(t-1)) \cdot 365 \cdot N(t) \cdot K_{\text{з}}}{2 \cdot K_{\text{р}}}, \quad (16)$$

где $N(t)$ – проектное число добывающих скважин.

5. Уравнение Адамова – Бриксмана для движения газа по стволу скважины

$$P_{\text{уст}} = \sqrt{\frac{P_{\text{з}}(t)^2 - \theta(q(t))^2}{\text{mathitexp}(2S)}} \quad (17)$$

6. Уравнение движения газа по шлейфовым трубам в системе сбора:

$$q(t) = KD_{\text{шл}}^2 \sqrt{\frac{P_{\text{уст}}^2 - P_{\text{вых}}^2}{\lambda \bar{\rho} Z(P_{\text{срт}}; T_{\text{срт}}) T_{\text{срт}} L_{\text{шл}}}}, \quad (18)$$

где $P_{\text{вых}}$ – давление газа на выходе из системы сбора, МПа;

λ – коэффициент гидравлического сопротивления шлейфовых труб;

$\bar{\rho}$ – относительная плотность газа по воздуху;

$P_{\text{срт}}$ – среднее давление в скважине, МПа.

$T_{\text{срт}}$ – средняя температура газа в системе сбора, К;

$L_{\text{шл}}$ – длина шлейфовых труб, м.

7. Формула расчета требуемой мощности компрессорного агрегата для подачи газа в газопровод [7]

$$N(t) = \frac{0,004 \cdot q(t) \cdot N(t) \cdot T_{\text{срт}} \cdot Z(P_{\text{срт}}; T_{\text{срт}}) \cdot k_t}{\eta \cdot (k_t - 1)} \left(\left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{срт}}} \right)^{\frac{k_t - 1}{k_t}} - 1 \right), (19)$$

где k_t – показатель адиабаты добываемого газа на t -й год разработки.

8. Дебит конденсата [8]

$$q_{\text{конд}}(t) = q(t) \cdot \text{ПС}_{5+}(P_{\text{пл}}(t)) \quad (20)$$

где ПС_{5+} – текущее потенциальное содержание конденсата в пластовом газе, определяемое в результате проведения РВТ-эксперимента «Дифференциальная конденсация», г/м³ [9].

Таким образом, формируется вариант дальнейшей разработки месторождения, который отличается от утвержденного в проектом документе тем, что каждый год дополнительно по заданной методике пересчитывается величина оптимальной депрессии на пласт, которая и будет задаваться в качестве постоянной на каждый год разработки.

Критерием остановки разработки месторождения является выполнение условия (3), при котором дальнейшая эксплуатация скважины невозможна. Для проверки работоспособности созданной методики проводится сравнительный анализ основных технологических показателей утвержденного и предложенного вариантов разработки.

Обсуждение результатов

В качестве объектов исследования были выбраны шесть обводненных добывающих скважин одного из разрабатываемых газоконденсатных месторождений страны постсоветского пространства. Выбранные скважины выделены на карте данного месторождения, приведенной на рисунке 1.

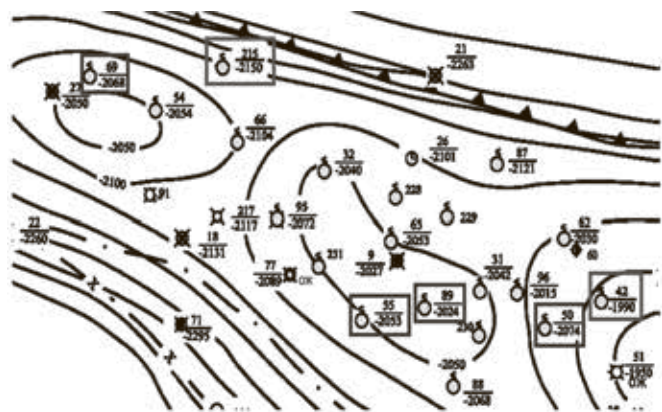


Рис. 1. Определение объектов исследования на карте месторождения / Fig. 1. Identification of study objects on the field map

Согласно проектному документу на разработку указанного месторождения, на данный момент на добывающих скважинах имеется скоростной режим эксплуатации скважин. В соответствии с этим максимально разрешенная скорость потока газа на устье не должна быть выше 10 м/с.

Установленный технологический режим эксплуатации скважин представлен в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Утвержденный технологический режим эксплуатации скважин исследуемого месторождения / Approved technological operation mode of wells at the studied field

№ скв.	$P_{\text{заг}}, \text{МПа}$	$P_{\text{пл}}, \text{МПа}$	$\Delta P, \text{МПа}$	$P_{\text{у}}, \text{МПа}$	$\vartheta_{\text{у}}, \text{м/с}$	$Q_{\text{р}}, \text{тыс. м}^3/\text{сут}$
42	4,41	5,13	0,72	3,73	3	45
215	4,41	4,79	0,37	3,73	3	69
50	4,53	5,10	0,57	3,82	11	149
55	4,41	5,20	0,78	2,75	11	118
69	4,64	5,08	0,44	3,92	11	158
89	4,64	5,05	0,41	3,92	11	155

Стоит отметить, что на основании проведенного детального изучения технологического режима эксплуатации данных скважин и расчета показателей, входящих в (2), было установлено, что на двух из шести выбранных скважинах наблюдается недостаток скорости на забое, что приводит к образованию жидкостных пробок. А на остальных четырех – избыток устьевой скорости, что приводит к повышению скорости коррозии насосно-компрессорных труб.

На рисунке 1 скважины с нарушением забойной скорости выделены красным цветом, а с нарушением устьевой – синим. Результаты проверки выполнения критерия технологического режима эксплуатации скважин на исследуемом месторождении приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Результаты проверки выполнения критерия технологического режима эксплуатации скважин исследуемого месторождения / Results of the assessment of compliance with the technological operation mode criteria for wells at the studied field

№ скв.	$\Delta P_{\text{min}}, \text{МПа}$	$\Delta P_{\text{max}}, \text{МПа}$	$\Delta P_{\text{факт}}, \text{МПа}$	$Q_{\text{min}}, \text{тыс. м}^3/\text{сут}$	$Q_{\text{max}}, \text{тыс. м}^3/\text{сут}$	$Q_{\text{факт}}, \text{тыс. м}^3/\text{сут}$
42	2,41	2,74	0,72	127,847	134,564	45
215	1,15	1,84	0,37	127,847	163,363	69
50	0,22	0,54	0,57	79,056	146,394	149
55	0,24	0,55	0,78	52,423	94,291	118
69	0,17	0,41	0,44	80,086	150,568	158
89	0,17	0,39	0,41	80,086	149,178	155

Для устранения выявленных нарушений была применена предложенная методика расчета оптимальной депрессии на пласт, которая удовлетворяла бы критерию оптимальности (1). В результате решения задачи полученные значения оптимальной депрессии на пласт совпадают с верхней границей, рассчитанной ранее. Это означает, что поддержание максимально допустимой депрессии на пласт гарантированно поможет избежать образования жидкостных пробок на забоях данных скважин, а также снизит скорость коррозии устьевого оборудования.

С учетом того что рассматриваемые скважины обеспечивают значительную часть добычи газа на данном месторождении, оптимизация технологического режима эксплуатации скважин приводит к росту годовых отборов газа уже с первого года применения нового критерия.

Результаты расчетов оптимальной депрессии на пласт и годового отбора на первый год применения нового критерия технологического режима совместно со сравнением утвер-

денных и рассчитанных значений годового отбора газа приведены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Сравнение оптимальной депрессии на пласт и годовых отборов газа при ее применении с проектными показателями по результатам расчетов /
Comparison of the optimal reservoir pressure depletion and annual gas withdrawals when applied, with design parameters based on calculation results

№ скв.	$\Delta P_{\text{опт}}, \text{ МПа}$	$\Delta P_{\text{проект}}, \text{ МПа}$	$Q_{\text{год проект}}, \text{ МЛН м}^3$	$Q_{\text{год}} (\Delta P_{\text{опт}}), \text{ МЛН м}^3$	$Q_{\text{год}} (\Delta P_{\text{опт}}) / Q_{\text{год проект}}$
42	2,74	0,7	199,26	239,7	1,2
215	1,84	0,4			
50	0,54	0,6			
55	0,55	0,8			
69	0,41	0,4			
89	0,39	0,4			

Как видно из таблицы 3, применение оптимальной депрессии на рассматриваемых скважинах позволит уже в первый год разработки повысить годовые отборы газа на 20 %, несмотря на период падающей добычи газа на рассматриваемом месторождении.

Аналогичным образом были рассчитаны оптимальные депрессии на пласт для выбранных скважин на прогноз до достижения минимального пластового давления или давления «забрасывания» [10].

Для проведения сравнительного анализа были рассмотрены следующие основные показатели разработки:

1. Коэффициент извлечения газа – КИГ, %.
2. Коэффициент извлечения конденсата – КИК, %.
3. Срок разработки месторождения – $T_{\text{разраб}}$ лет.

Для наглядного представления была построена сравнительная диаграмма данных показателей разработки, представленная на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, применение нового критерия технологического режима эксплуатации обводненных газовых скважин позволит не только продлить срок их эксплуатации, но и улучшить значения основных показателей разработки.

При этом стоит отметить, что выполнение ограничения по скорости потока газа на забое позволит выносить не толь-

ко пластовую и конденсационную воды, но и выпавший в призабойной зоне в результате ретроградных явлений газоконденсат, что может повысить величину коэффициента его извлечения.

Таким образом, работоспособность предлагаемой методики подтверждается.

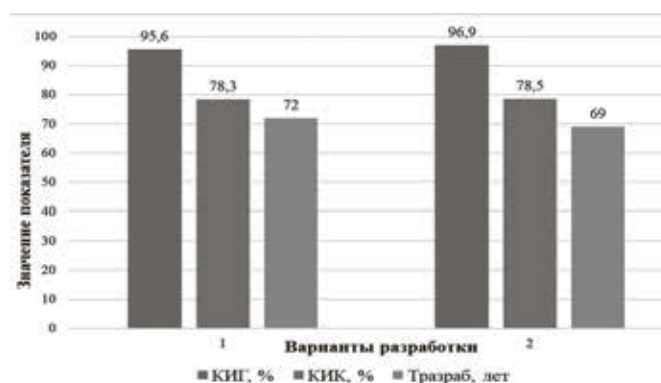


Рис. 2. Сравнительная диаграмма основных показателей для следующих вариантов разработки:

1 – утвержденный вариант; 2 – предлагаемый вариант /

Fig. 2. Comparative diagram of key indicators for the following development options: 1 – approved option; 2 – proposed option

Заключение

1. Предложена методика расчета оптимальной депрессии на пласт обводненных газовых скважин газоконденсатного месторождения, находящегося на поздней стадии разработки. Методика не требует проведения большого количества сложных вычислений и обращения к гидродинамическому симулятору, а исходные данные для расчетов можно взять из одной таблицы – технологического режима эксплуатации скважин.

2. Выполнена проверка работоспособности предлагаемой методики прогнозированием основных показателей разработки реального газоконденсатного месторождения, расположенного в постсоветском пространстве.

3. Предлагаемый вариант разработки, предполагающий изменение критерия технологического режима эксплуатации скважин, позволит по сравнению с утвержденным помимо сохранения фонда скважин и увеличения их межремонтного периода дополнительно извлечь 1,334 млрд м³ газа и 2,38 тыс. тонн конденсата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алиев ЗС, Мараков ДА. Разработка месторождений природных газов: учебное пособие для вузов. Москва, 2011: 340. [Aliyev ZS, Marakov DA. Development of natural gas fields: a textbook for universities. Moscow, 2011: 340 (In Russ.)]
2. Алиев ЗС, Андреев СА, Власенко АП. Технологический режим работы газовых скважин. Москва, 1978: 279. [Aliyev ZS, Andreev SA, Vlasenko AP. Technological operation mode of gas wells. Moscow, 1978: 279 (In Russ.)]
3. Гриценко АИ, Алиев ЗС, Ермилов ОМ и др. Руководство по исследованию скважин. Москва, 1995: 523. [Gritsenko AI, Aliyev ZS, Ermilov OM, et al. Guide to well research. Moscow, 1995: 523 (In Russ.)]
4. Адамов ГА. Движение газа по вертикальным трубам. Вопросы добычи, транспорта и переработки газа: труды ВНИИГАЗ. Москва; Ленинград, 1951. [Adamov GA. Gas flow in vertical pipes. Issues of gas production, transportation, and processing: Proceedings of VNIIGAZ. Moscow; Leningrad, 1951 (In Russ.)]
5. Адамов ГА. Движение реальных газов по вертикальным трубам при высоких давлениях. Вопросы добычи, транспорта и переработки газа: труды ВНИИГАЗ. Москва; Ленинград, 1951. [Adamov GA. Flow of real gases in vertical pipes under high pressures. Issues of gas production, transportation, and processing: Proceedings of VNIIGAZ. Moscow; Leningrad, 1951 (In Russ.)]
6. Альтшуль АД. Гидравлические потери давления в трубопроводах. Москва, 1963. [Altshul AD. Hydraulic pressure losses in pipelines. Moscow, 1963 (In Russ.)]
7. Арманд АА, Невструева ЕИ. Исследование механизма двухфазной смеси в вертикальной трубе. Известия ВТИ. 1950: 2. [Armand AA, Nevstrueva EI. Study of the mechanism of two-phase mixture in a vertical pipe. Izvestiya VTI. 1950;2 (In Russ.)]

8. Басниев КС, Шаталов АТ, Ширковский АИ и др. Комплексные промысловые исследования на Оренбургском месторождении. Москва, 1980. [Basniev KS, Shatalov AT, Shirkovsky AI, et al. Comprehensive field studies at the Orenburg field. Moscow, 1980 (In Russ.)]
9. Барнаев МК, Тавровский ЕН, Трегубова ЭЛ. О размере минимальных пульсаций в турбулентном потоке. *Труды ДАН СССР*. 1949;66(5). [Barnaev MK, Tavrovsky EN, Tregubova EL. On the size of minimal pulsations in a turbulent flow. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*. 1949;66(5) (In Russ.)]
10. Вяхирев РИ, Коротаев ЮП. Теория и опыт разработки месторождений природных газов. Москва, 1999. [Vyakhirev RI, Korotaev YuP. Theory and practice of natural gas field development. Moscow, 1999 (In Russ.)]
11. Брусиловский АИ. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. Москва, 2002: 575. [Brusilovsky AI. Phase transitions in the development of oil and gas fields. Moscow, 2002:575 (In Russ.)]
12. Касьянов ВМ. Гидромашины и компрессоры: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, 1981: 295. [Kasyanov VM. Hydro-machines and compressors: textbook for universities. 2nd ed., revised and expanded. Moscow, 1981: 295 (In Russ.)]
13. Сокотущенко ВН. Определение удельных коэффициентов продуктивности и дебита группы скважин с учётом неоднородности призабойной зоны пласта. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2023;2:41-5. [Sokotushchenko VN. Determining specific productivity coefficients and well rates for a group of wells considering the heterogeneity of the near-wellbore zone. *Geology, Geophysics, and Development of Oil and Gas Fields*. 2023;2:41-5 (In Russ.)]
14. Сокотущенко ВН, Григорьев БА, Григорьев ЕБ. Моделирование процессов массообмена и фильтрации пластовых газоконденсатных систем, содержащих неуглеводородные компоненты. *Труды РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина*. 2022;3(308):82-100. [Sokotushchenko VN, Grigoryev BA, Grigoryev EB. Modeling of mass exchange and filtration processes in reservoir gas-condensate systems containing non-hydrocarbon components. *Proceedings of the Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2022;3(308):82-100 (In Russ.)]
15. Позевалкин ВВ. Исследование проблем эксплуатации обводненных газовых скважин на поздней стадии разработки. *Научные исследования*. 2016;6(7):19-24. [Pozyevalkin VV. Study of the problems of operation of water-bearing gas wells in the late stages of development. *Scientific Research*. 2016;6(7):19-24 (In Russ.)]
16. Горюнова АМ. Системный анализ проблем эксплуатации газоконденсатных месторождений на поздней стадии разработки. *Теория и практика современной науки*. 2017;12(30):190-8. [Goryunova AM. System analysis of problems in the operation of gas-condensate fields in the late stages of development. *Theory and Practice of Modern Science*. 2017;12 (30):190-8 (In Russ.)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вадим Николаевич Сокотущенко –
доктор технических наук, доцент, РГУ нефти и газа
(НИУ) имени И. М. Губкина, 119991, г. Москва, Российская
Федерация, e-mail: sokotushchenko@mail.ru

Евгений Александрович Евстафеев –
преподаватель, Филиал РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И. М. Губкина, 100125, г. Ташкент, Республика
Узбекистан

Аль-Кадхи Халил Ахмед Али Салех –
инженер по УЭЦН (III категория), магистрант РГУ нефти
и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 119991, г. Москва,
Российская Федерация

Критерии авторства / Contribution:

В. Н. Сокотущенко – общее руководство, планирование исследований, участие в обработке результатов; Е. А. Евстафеев – анализ данных, проверка рукописи, написание текста, редактирование, редактирование; Х. А. А. С. Аль-Кадхи – концептуализация, методология, обработка данных, написание текста. / V. N. Sokotushchenko – supervision, project administration; E. A. Evstafeyev – data analysis, validation, writing – review & editing; Khalil Ahmed Ali Saleh Al-Qadi – conceptualization, methodology, data curation, writing – original draft.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии любых финансовых или личных интересов, которые могут повлиять на результаты исследования и его интерпретацию. / The authors declare that they have no financial or personal interests that could have influenced the results of the research or its interpretation.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.03.2025.

Поступила после рецензирования: 20.05.2025.

Принята к публикации: 25.05.2025.

Article info

Received: 17.03.2025.

Revised: 20.05.2025.

Accepted: 25.05.2025.

ABOUT THE AUTHORS

Vadim N. Sokotushchenko –
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Russian State University
of Oil and Gas (NRU) named after I. M. Gubkina, 119991,
Moscow, Russian Federation, e-mail: sokotushchenko@mail.ru

Evgeniy A. Evstafeyev – Lecturer, Branch of the Russian State
University of Oil and Gas (NRU) named after I. M. Gubkin,
100125, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Al-Qadi Khalil Ahmed Ali Saleh –
Master's Student, Russian State University of Oil and Gas
(NRU) named after I. M. Gubkina, 119991, Moscow, Russian
Federation

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ НА ДЕГАЗАЦИОННУЮ СКВАЖИНУ В ОБВОДНЕННОМ МАССИВЕ

Б. В. Хохлов, М. Д. Рожко✉

ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

✉ mdr6464@mail.ru

Аннотация: На примере подработки дегазационной скважины, расположенной на промплощадке шахты, проведено исследование геомеханических процессов в обводненном массиве горных пород. На основе детального анализа влияния горных работ были проведены расчеты радиальных нагрузок на крепь скважины, сдвижений и деформаций земной поверхности, а также вертикальных деформаций по оси дегазационной скважины. Рассмотрена возможность проведения очистных работ в предохранительном целике с целью минимизации негативных последствий подработки при максимальной выемке угля.

Ключевые слова: подработка скважины, дегазационная скважина, сдвижение, деформации, предохранительный целик, очистные работы, устойчивость, кратность подработки, нарушенность скважин

Благодарности, признательность, финансирование: Исследования выполнены в рамках работы FRSR-2023-0006. «Исследование устойчивости и трансформации напряженно-деформированного состояния обводненных массивов горных пород».

Для цитирования: Хохлов БВ, Рожко МД. Исследование влияния очистных работ на дегазационную скважину в обводненном массиве. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):42-48. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-42-48>.

INVESTIGATION OF THE IMPACT SECOND MINING OPERATIONS ON A BOREHOLE DRILLED IN A SATURATED WITH WATER ROCK MASS

B. V. Khokhlov, M. D. Rozhko✉

Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), Donetsk, DPR, Russian Federation

✉ mdr6464@mail.ru

Abstract: A research into geomechanical processes in a fluid-saturated rock mass is described in the article using the example of undermining a methane drainage borehole located at the industrial site of a mine. Based on the detailed analysis of the mining operations impact, the calculations of radial loads on the borehole casing, of the ground surface displacements and deformations, and as well of the vertical deformations along the methane drainage borehole axis have been carried out. The possibility of performing second mining operations on a protection pillar to minimize the negative consequences of undermining at the maximum coal extraction is considered.

Keywords: borehole undermining, methane drainage borehole, displacement, deformations, protection pillar, second mining operations, stability, undermining factor, borehole faulting

Acknowledgments, funding, financial Support: The research was carried out within the framework of FRSR-2023-0006 Study of stability and transformation of the stress-strain state of flooded rock mass.

For citation: Khokhlov B. V., Rozhko M. D. Investigation of the impact second mining operations on a borehole drilled in a saturated with water rock mass. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):42-48. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-42-48>.

Введение

Согласно «Российской программе развития угольной промышленности», добыча угля в России к 2030 году должна быть доведена до 480 тонн в год. Один из путей достижения этой цели – рациональная добыча угля в соответствии с законом Российской Федерации «О недрах».

Для охраны выработок, а именно стволов, скважин различного назначения, в горном массиве оставлены целики, где сосредоточены существенные запасы угля. По данным [1], в предохранительных целиках законсервировано от 5 до 7 % запасов угля, отведенных шахте для выемки. Ведение горных работ в зонах влияния на выработки или в целике провоцирует возникновение различных разрушений и деформаций вмещающего массива, которые ухудшают состояние крепи выработок, а также объектов поверхности.

Проблема устойчивости вертикальных выработок в различных горно-геологических условиях при отработке угольного пласта в разные годы рассматривалась в работах как российских, так и зарубежных исследователей [2–12]. Одной из причин снижения продуктивности и устойчивости скважин являются деформационные процессы массива, в том числе связанные с изменением его коллекторских свойств [13–15]. Особенно интенсивно данные процессы влияют на устойчивость скважин на участках их пересечения со слоями водонасыщенных пород [15]. Наибольшую угрозу представляет потеря устойчивости скважин в зоне влияния горного давления (перед забоем) и зоне интенсивного смещения нависающих козырьков (за забоем).

Часто встречающийся фактор, влияющий на устойчивость, – наличие вывалов породы из ее стенок, что с большой долей вероятности происходит при подработке скважины, а также применение защитных мероприятий без учета обводненности массива. Важно, чтобы при отработке целиков, когда выработка попадает в зону влияния горных работ, были сохранены ее эксплуатационные характеристики. Для этого необходим достоверный прогноз последствий отработки целиков как в массиве горных пород, так и для объектов на земной поверхности для принятия своевременных корректных решений по мерам защиты выработок.

Цель эксперимента: минимизация негативного влияния очистных работ на подрабатываемую скважину при максимальном извлечении угля.

Материал и методы исследования

Одним из наиболее эффективных методов изучения геомеханических процессов, протекающих в подрабатываемом горном массиве, является экспериментальный. В данном случае применялся комплексный метод, включающий анализ теоретических и экспериментальных исследований.

Институт РАНМИ имеет многолетний опыт подработки технических скважин, в том числе и дегазационных [1, 2] в различных горно-геологических и горнотехнических условиях. Подработка проводилась как в пластах, пересеченных скважинами, так и в пластах, залегающих под забоем скважины. В одних случаях скважины сохраняли эксплуатационные характеристики и функционировали в штатном режиме, а в других в результате подработки скважины были выведены из строя. Проанализировано более 80 случаев подработки технических скважин, в результате чего были установлены

вид и параметры зависимости, учитывающей влияние полноты отработки условного целика u и кратности подработки забоя скважины (зумпфа) K_z на распределение нарушенности технических скважин:

$$K_z = 340 - \frac{138}{u}, \text{ при } u \geq 0,406 \quad (1)$$

Полнота отработки предохранительного целика призвана характеризовать степень внедрения очистных работ в его границы. Поскольку в различные периоды предохранительные целики строились по разным нормативным документам и поэтому для разных по значимости скважин применялись целики разных размеров, с целью унификации данного параметра логично рассматривать полноту отработки некоторого условного целика, построенного по граничным углам сдвижения, регламентированным «Правилами подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом» (ГСТУ 101.00159226.001-2003) для различных регионов Донбасса. Так, для Западного Донбасса эти углы по простиранию пласта составляют $\delta_0 = 65^\circ$.

Тогда полнота отработки целика u определится из соотношения [18]

$$u = \frac{S_{оч}}{S_{общ}},$$

где $S_{оч}$ – площадь отработанной части условного целика очистными выработками, m^2 ;

$S_{общ}$ – общая площадь условного целика, m^2 .

Следует подчеркнуть, что при определении параметра u предполагается, что отработка целика очистными выработками проводится от его периферии к центру.

Кратность подработки забоя (зумпфа) дегазационной скважины K_z характеризует относительную удаленность нижней точки скважины от разрабатываемого пласта и представляет собой расстояние, измеряемое по вертикали, от забоя подрабатываемой скважины до разрабатываемого пласта, отнесенную к вынимаемой мощности этого пласта:

$$K_z = \frac{h_z}{m},$$

где h_z – расстояние, измеряемое по вертикали, от забоя подрабатываемой скважины до разрабатываемого пласта, м. При минимальной глубине лавы 487 м и глубине зумпфа скважины 473 м h_z составит 14 м;

m – вынимаемая мощность пласта, м, $m_{max} = 1,62$ м.

Результаты исследований

Рассмотрим результаты эксперимента по уменьшению размеров целика под дегазационную скважину № 1, которая попадает в зону влияния очистных работ 501-й лавы пласта c_3 шахты имени Героев Космоса.

Дегазационная скважина № 1 пробурена в предохранительном целике под промплощадку шахты, и отдельный целик для ее охраны не строился. Скважина закреплена стальными трубами с заполнением затрубного пространства песчано-цементным раствором. В процессе ведения очистных работ 501-й лавой пласта c_3 скважина попадает в зону ее влияния. Горнотехнические условия работы лавы приведены в таблице.

Отработка лавы производилась по восстанию.

Условия ведения очистных работ осложнены наличием в верхней части массива обводненных песков буцакского горизонта мощностью 23 м.

Таблица / Table

Условия отработки 501-й лавой пласта c_5 /
Conditions for mining the 501st lava formation c_5

Показатель / Indicator	Значение / Value
Средняя глубина лавы, м	От 518 до 487
Марка угля	ДГ
Мощность пласта, м	0,70–1,32
Мощность наносов, м	130
Мощность мезозойских (кайнозойских) отложений, м	46
Угол падения пласта, градус	3–5
Длина лавы, м	250
Длина выемочного столба, м	1 020 (820)
Способ управления кровлей	Полное обрушение
Среднее месячное продвижение очистного забоя, м	135

Исследованиями [11], [17] установлено, что степень влияния очистных работ на состояние подрабатываемых скважин в первом приближении может быть охарактеризована двумя параметрами: кратностью подработки забоя скважины (зумпфа) K_z и полнотой отработки условного целика u . Для данных условий $K_z = 8,64$.

Проектная полнота выработки условного целика u (рис. 1) в соответствии с [17] равна 0,013.

Кривая зависимости (1) графически разграничивает области нарушенных и ненарушенных в процессе подработки скважин [11].

Согласно распределению нарушенности технических скважин, в зависимости от полноты отработки условного целика и кратности подработки забоя данная скважина попадает в область ненарушенных скважин.

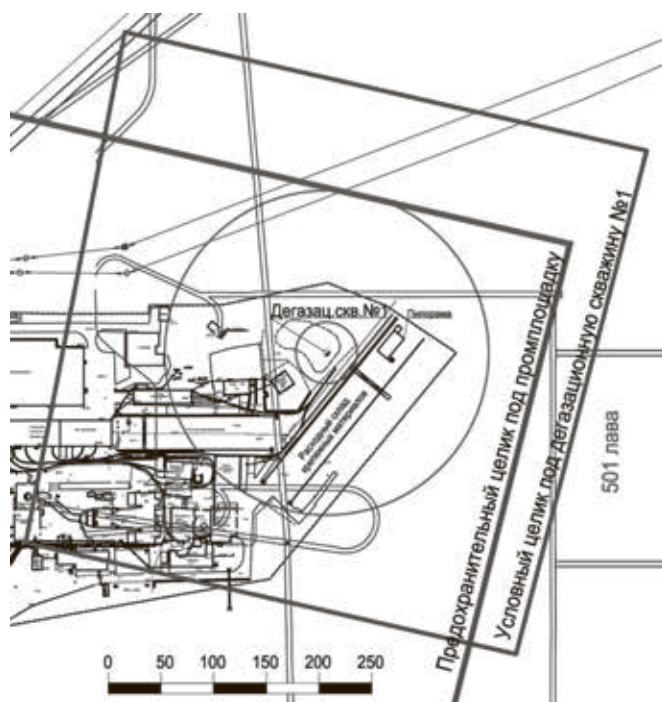


Рис. 1. Схема для определения полноты отработки условного целика u /
Fig. 1. Scheme for determining the completeness of the protection pillar u

Деформации среза крепи технических скважин при подработке образуются в зонах послонных сдвигов пород, которые, в свою очередь, локализуются в районах максимальных наклонов породных слоев. Точное прогнозирование локализации максимальных наклонов при ведении очистных работ позволит избежать нарушений крепи технических скважин в виде срезов при послонных сдвигах пород. Анализ геомеханической ситуации на образование послонных сдвигов показал, что дегазационная скважина в рассматриваемых условиях не попадает в зону максимальных наклонов от 501-й лавы, таким образом, опасность среза ствола скважины отсутствует.

При данных условиях ведения горных работ верхняя часть скважины попадает в зону малых знакопеременных деформаций, а нижняя часть – в зону опорного давления [11].

Для детального анализа влияния горных работ 501-й лавы пласта c_5 на состояние дегазационной скважины № 1, согласно ГСТУ 101.00159226.001-2003, а также [16–20], был проведен предварительный расчет возможных сдвижений и деформаций по всем критериям.

Радиальные нагрузки на крепь скважины

Расчет радиальных нагрузок на крепь дегазационной скважины № 1 проведен согласно [17] для условий максимально возможного оконтуривания ее очистными выработками.

График расчетных нагрузок приведен на рисунке 2.

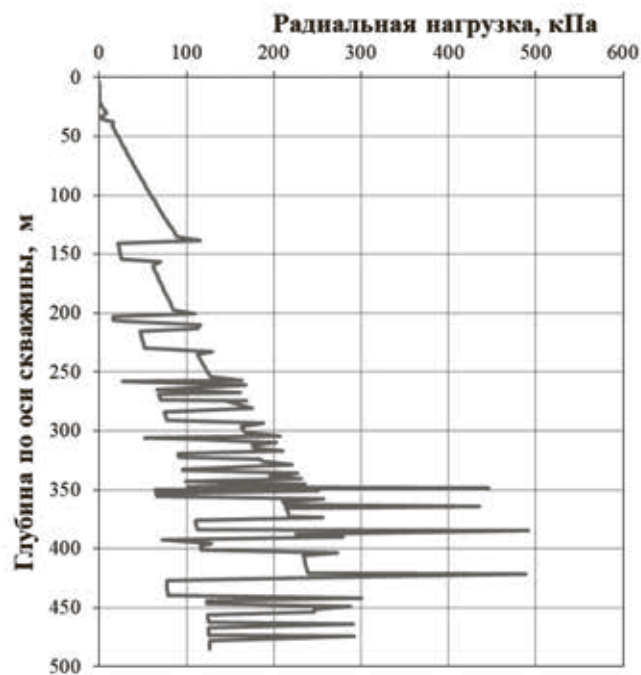


Рис. 2. Результаты расчета радиальных нагрузок на крепь дегазационной скважины № 1 /

Fig. 2. Results of calculation of radial loads on the support of degassing well № 1

Согласно графику, на большей части протяжения скважины радиальная нагрузка, за исключением четырех участков пересечения с угольными пластами, не превышает 300 кПа. Для существующего диаметра скважины данные нагрузки не превышают несущей способности даже 5 см слоя тампонажного бетона (рис. 3).

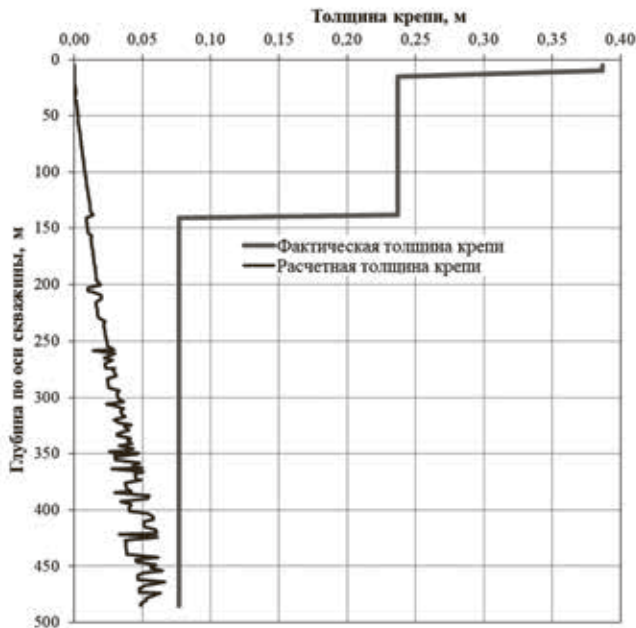


Рис. 3. Графики фактической и необходимой расчетной крепи скважины /
Fig. 3. Graphs of the actual and required design support of the well

Сдвиги и деформации земной поверхности

Расчет ожидаемых сдвигов и деформаций земной поверхности производился согласно ГСТУ 101.00159226.001-2003, также исходя из возможных максимальных значений. Так, вынимаемая мощность для всех пластов принята как максимальная суммарная мощность угольных пачек и прослоев аргиллита по данным геологических колонок, а длина выемочного столба – не менее значений полной подработки ($N_1 \geq 1$), то есть 680 м.

Таким образом, расчеты велись для следующих условий отработки:

- марка угля – ДГ;
- вынимаемая мощность – 1,62 м;
- длина лавы – 253 м;
- средняя глубина отработки – 498,0–515,8 м;
- средний угол падения – 3°;
- мощность наносов – 130 м;
- мощность мезозойских отложений – 46 м;
- лава считается одиночной, закладка отсутствует.

По результатам расчетов построена мульда сдвижения (рис. 4).

На рисунке 4 за «ноль» приняты координаты центра лавы. Дегазационная скважина № 1 находится на расстоянии 210 м от 501-го бортового штрека или в 335 м от оси лавы. Согласно рисунку 4, на данном расстоянии скважина попадает в краевую часть мульды сдвижения, характеризующуюся малыми деформациями.

При изменении нижней границы лавы (места заложения разрезной печи) на величину L величины сдвигов и деформаций дегазационной скважины изменяются. Для их определения проведена серия расчетов по всему диапазону возможных значений.

Определение прогнозных значений ожидаемых сдвигов и деформаций выполнено с учетом активизации процесса сдвижения на ранее отработанных вышележащих пластах c_9 , c_{10} и c_{11} . Так как скважина пройдена после отработки данных пластов, деформации от их отработки не учитываются.

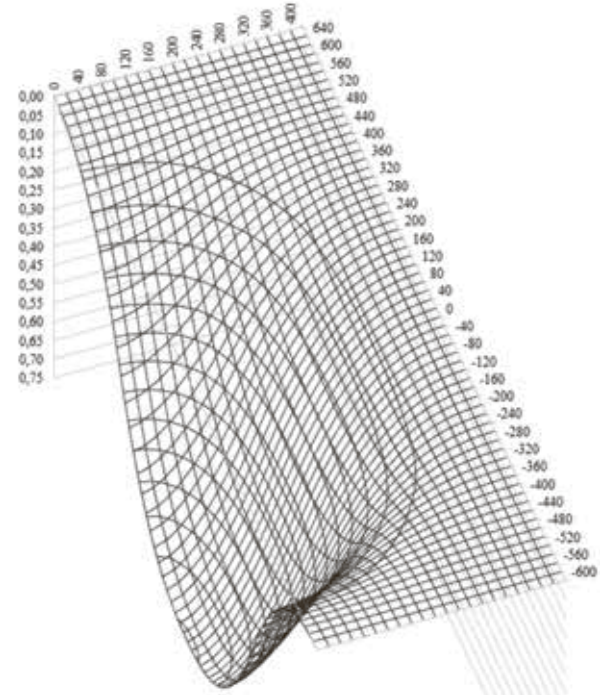


Рис. 4. Полумульда оседаний земной поверхности по простираению от влияния 501-й лавы /

Fig. 4. The half-wave of subsidence of the Earth's surface along the strike from the influence of 501 lava

При дальнейшем увеличении величины L дегазационная скважина располагается напротив плоского дна мульды сдвижения и деформации по всей ее длине не меняются.

Максимальные суммарные деформации земной поверхности на устье скважины при всем возможном диапазоне ведения очистных работ 501-й лавы составляют:

- для наклонов – $i_{max} = 0,825 \cdot 10^{-3}$;
- для кривизны – $K_{max} = 0,0125 \text{ 1/м}$;
- для горизонтальных деформаций – $\xi_{max} = 0,817 \cdot 10^{-3}$.

Эти величины значительно ниже нормативных допустимых показателей деформаций земной поверхности для всех видов инженерных сооружений, расположенных на подготавливаемом участке, кроме подкрановых путей мостового крана расходного склада крепежных материалов.

Допустимый показатель горизонтальных деформаций земной поверхности для мостовых кранов, расположенных на открытой эстакаде, в поперечном направлении, перпендикулярном подкрановым путям, определяют по формуле 7.12 ГСТУ 101.00159226.001-2003

$$[\varepsilon] = \frac{\Delta}{L_k} - K h_n,$$

где Δ – минимальное значение суммы соответствующих зазоров между ребрами колес крана и головками подкрановых рельсов, м; $\Delta = 0,02$;

L_k – длина мостового пролета, м, определена графически, $L_k = 33,3$ м;

h_n – высота подкрановой части колонны от уровня подошвы фундамента до головки рельса, м, $h_n = 0,5$ м;

K – расчетный показатель кривизны земной поверхности в поперечном направлении, перпендикулярном подкрановым путям, $K_{max} = 0,000194 \text{ 1/м}$.

В данных условиях $[\varepsilon] = 0,54 \cdot 10^{-3}$ при максимальном расчетном значении $\varepsilon_{max} = 0,817 \cdot 10^{-3}$, то есть возможны нарушения

ния подкрановых путей мостового крана расходного склада крепежных материалов.

Вертикальные деформации по оси дегазационной скважины

При ведении очистных работ в зоне влияния на вертикальную выработку происходит оседание ее верхней части, вследствие чего вертикальная выработка испытывает деформации сжатия. Для определения вертикальных деформаций проведена серия расчетов по определению оседаний массива через 10 м. Расчеты проводились как суммарные от влияния как 501-й лавы пласта c_3 , так и от активизации процесса сдвижения по пластам c_9 , c_{10}^B и c_{11} . По результатам расчетов через разность оседаний определены вертикальные деформации сжатия.

На рисунке 5 приведены итоговые значения проведенных расчетов.

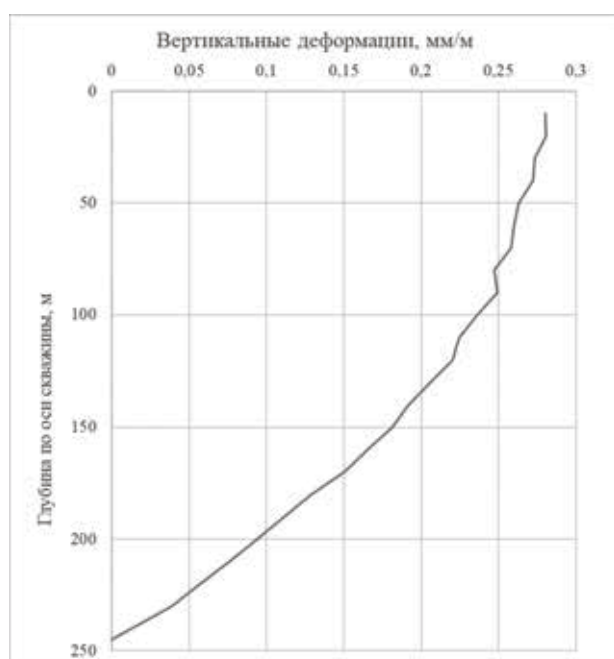


Рис. 5. Вертикальные деформации по оси дегазационной скважины / Fig. 5. Vertical deformations along the axis of the degassing well

Согласно графику, максимальные значения вертикальных сжатий ϵ_z не превышают величины $0,28 \cdot 10^{-3}$, что значительно

но меньше предельно допустимых для сборной крепи (крепь скважины состоит из металлических труб и затампонированного затрубного пространства) $2 \cdot 10^{-3}$ в соответствии с ГСТУ 101.00159226.001-2003.

Обсуждение результатов исследований

Основываясь на результатах анализа геомеханической ситуации на образование послонных сдвигов, который показал, что дегазационная скважина в рассматриваемых условиях обводненного массива не попадает в зону максимальных наклонов от 501-й лавы, можно сказать, что опасность срезаствола скважины отсутствует.

На большей части протяжения скважины радиальная нагрузка, за исключением четырех участков пересечения с угольными пластами, не превышает 300 кПа.

Максимальные суммарные деформации земной поверхности на устье скважины при всем возможном диапазоне ведения очистных работ 501-й лавы составляют величины значительно ниже нормативных допустимых показателей деформаций земной поверхности для всех видов инженерных сооружений, расположенных на подрабатываемом участке (кроме мостовых кранов):

- для наклонов – $i_{max} = 0,825 \cdot 10^{-3}$;
- для кривизны – $K_{max} = 0,0125 \cdot 1/\text{км}$;
- для горизонтальных деформаций – $\epsilon_{max} = 0,817 \cdot 10^{-3}$.

Максимальные значения вертикальных сжатий не превышают величины $0,28 \cdot 10^{-3}$, что значительно меньше предельно допустимых для сборной крепи.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований геомеханических процессов в массиве горных пород, осложненном наличием водоносного горизонта мощностью 23 м.
2. На основе анализа большого объема научных исследований, модельных экспериментов, расчетов по оценке геомеханического состояния массива горных пород, вмещающего дегазационную скважину, установлено, что при ведении горных работ 501-й лавы пласта c_3 в зоне влияния на дегазационную скважину № 1 эта скважина сохранит эксплуатационные характеристики при любом месте заложения монтажного ходка.
3. Данный вывод подтвердился после фактической подработки скважины, что говорит о достаточном уровне прогноза геомеханической устойчивости скважины при ее подработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Страданченко СГ, Сарычев ВИ, Савин ИИ. Технологии отработки околоствольных целиков. Новочеркасск, 2004:128. [Stradanchenko SG, Sarychev VI, Savin II. Technologies for testing near-barrel sights. ko S.G. Novocherkassk, 2004:128 (In Russ.).]
2. Бригада ВС, Голик ВИ, Дмитрак ЮВ и др. Обеспечение устойчивости подрабатываемых наклонных дегазационных скважин при интенсивной разработке свит газоносных пластов. *Записки Горного института*. 2019;239:497-501. [Brigida VS, Golik VI, Dmitrak YuV, et al. Ensuring the stability of mined inclined degassing wells during intensive development of formations of gas-bearing formations. *Notes of the Mining Institute*. 2019;239:497-501 (In Russ.). DOI: 10.31897/PMI2019.5.497.]
3. Бригада ВС, Голик ВИ, Дмитрак ЮВ и др. Учет влияния ситуационных геомеханических условий для совершенствования дегазации подрабатываемого массива горных пород. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019;2:279-88. [Brigida VS, Golik VI, Dmitrak YV, et al. Accounting for the influence of situational geomechanical conditions to improve degassing of the mined rock mass. *Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2019;2:279-88 (In Russ.).]
4. Дмитрак ЮВ, Голик ВИ, Венигор ВВ. Геомеханические предпосылки сохранения устойчивости выработок при разработке водообильных месторождений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2018;1:221-6. [Dmitrak YuV, Golik VI, Venigor VV. Geomechanical prerequisites for maintaining the stability of workings during the development of water-rich deposits. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2018;1: 221-6 (In Russ.).]
5. Hawkes CD. Assessing the mechanical stability of horizontal boreholes in coal. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011;44(7):797-813. DOI: 10.1139/t07-021.

6. Brinkgreve RBJ, Bakker HL. Non-linear finite element analysis of safety factors. Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. Cairns, Australia, 1991: 11.
7. Jia-wen Zhou, Xing-guo Yang, Zhaohui Yang, et al. Micromechanics damage modeling of brittle rock failure processes under compression. *International Journal of Computational Methods*. 2013;10(6):1-18.
8. Муллер РА. Влияние горных выработок на деформацию земной поверхности. Москва, 1958:76. [Muller RA. The influence of mining operations on the deformation of the Earth's surface. Moscow, 1958 (In Russ.)]
9. Удеев АВ, Шиптенко АВ, Шевченко ВН и др. Выемка предохранительных целиков под вертикальные стволы шахт: Экспресс-информация. Москва, 1978: 31. [Udeev EM, Shiptenko AV, Shevchenko VN, et al. Excavation of safety sights for vertical shafts: Express information. Moscow, 1978 (In Russ.)]
10. Карабак ВА. К вопросу отработки запасов под северным вентиляционным стволом на шахте 9/15 треста «Анжероуголь». *Сб. науч. тр. Кемеровского горного института*. Кемерово, 1956;2:84-99. [Karabak VA. On the issue of mining reserves under the northern ventilation shaft at the 9/15 mine of the Anzherugol Trust. Collection of scientific papers of the Kemerovo Mining Institute. Kemerovo, 1956;2:84-99 (In Russ.)].
11. Кулибаба СБ, Хохлов БВ. Оценка влияния очистных выработок на технические скважины. *Уголь Украины*. 2004;9:26-7. [Kulibaba SB, Khokhlov BV. Assessment of the impact of treatment workings on technical wells. *Coal of Ukraine*. 2004;9:26-7 (In Russ.)]
12. Беркович ВХ. Оработка предохранительных целиков. *Известия вузов. Горный журнал*. 1996;3-4:93-104. [Berkovich VH. Testing of safety sights *Proceedings of universities. Mining magazine*. 1996;3-4:93-104 (In Russ.)]
13. Блохин ДИ, Закошменый ИМ, Кубрин СС и др. Численные исследования влияния изменений напряженно-деформированного состояния углеродного массива на устойчивость дегазационных скважин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;11:17-32. [Blokhin DI, Zakorshmenyi IM, Kubrin SS, et al. Numerical studies of the effect of changes in the stress-strain state of a carboniferous massif on the stability of degassing wells. *Mining information and analytical bulletin*. 2023;11:17-32 (In Russ.)]
14. Zhao X, Wang J, Mei Y. Analytical model of wellbore stability of fractured coal seam considering the effect of cleat filler and analysis of influencing factors. *Applied Sciences*. 2020;1(3)1169. DOI: 10.3390/app10031169.
15. Zhai J, Liu D, Li G, et al. Floor failure evolution mechanism for a fully mechanized longwall mining face above a confined aquifer. *Advances in Civil Engineering*. 2019;2019:8036928. DOI: 10.1155/2019/8036928.
16. Хохлов БВ, Кулибаба СБ. Рациональное ведение очистных работ в зонах влияния на технические скважины. *Зб. наук. пр. УкрНДМІ НАН України*. 2009;5(1):316-26. [Khokhlov BV, Kulibaba SB. Rational management of Mining operations in areas of influence on technical wells. *Zb. nauk. pr. UkrNDMI NAS of Ukraine*. Donetsk, 2009;5(1):316-326 (In Russ.)]
17. Расположение, охрана и поддержание горных выработок на угольных шахтах Донецкого бассейна: РД. Донецк, 2021:266. [Location, protection and maintenance mining operations at the coal mines of the Donets basin: RD. Donetsk, 2021:266 (In Russ.)]
18. Гавриленко ЮН, Петрушин АГ. Основные принципы моделирования сдвижений и деформаций земной поверхности методом конечных элементов. *Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-геологічна*. Донецьк, 2003;62:100-14. [Gavrilenko YuN, Petrushin AG. Basic principles of modeling of displacements and deformations of the Earth's surface by the finite element method. *Naukovi prazi DonNTU. The series is mining and geological*. Donetsk, 2003;6:100-14 (In Russ.)]
19. Кратч Г. Сдвижение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. Пер. с нем. Москва, 1978:494. [Kratch G. Displacement of rocks and protection of workable structures. Moscow. 1978:494 (In Russ.)]
20. Кузнецов СВ, Трофимов ВА. Экспериментально-аналитическое описание мульды сдвижения земной поверхности. *Маркшейдерия Казахстана: состояние и перспективы: Труды Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.Ж. Машанова*. Алматы, 2006:117-23. [Kuznetsov SV, Trofimov VA. Experimental and analytical description of the Earth's surface displacement model. *Surveying of Kazakhstan: state and prospects. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of A.J. Mashanov*. Almaty, 2006;117-23 (In Russ.)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS



Борис Валентинович Хохлов – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом горного давления, ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», 283086, г. Донецк, ДНР, Российская Федерация, e-mail: hbv@bk.ru

Boris V. Khokhlov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of Rock Pressure Department, Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), 283086, Donetsk, DPR, Russian Federation, e-mail: hbv@bk.ru



Марина Дмитриевна Рожко – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела горного давления, ФГБНУ «Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела», 283086, г. Донецк, ДНР, Российская Федерация, e-mail: mdr6464@mail.ru

Marina D. Rozhko – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Mining Pressure, Republican Academic R&D Institute of Mining Geology, Geomechanics, Geophysics and Mine Surveying (RANIMI), 283086, Donetsk, DPR, Russian Federation, e-mail: mdr6464@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.: The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.04.2025.

Поступила после рецензирования: 01.06.2025.

Принята к публикации: 08.06.2025.

Article info

Received: 22.04.2025.

Revised: 01.06.2025.

Accepted: 08.06.2025.

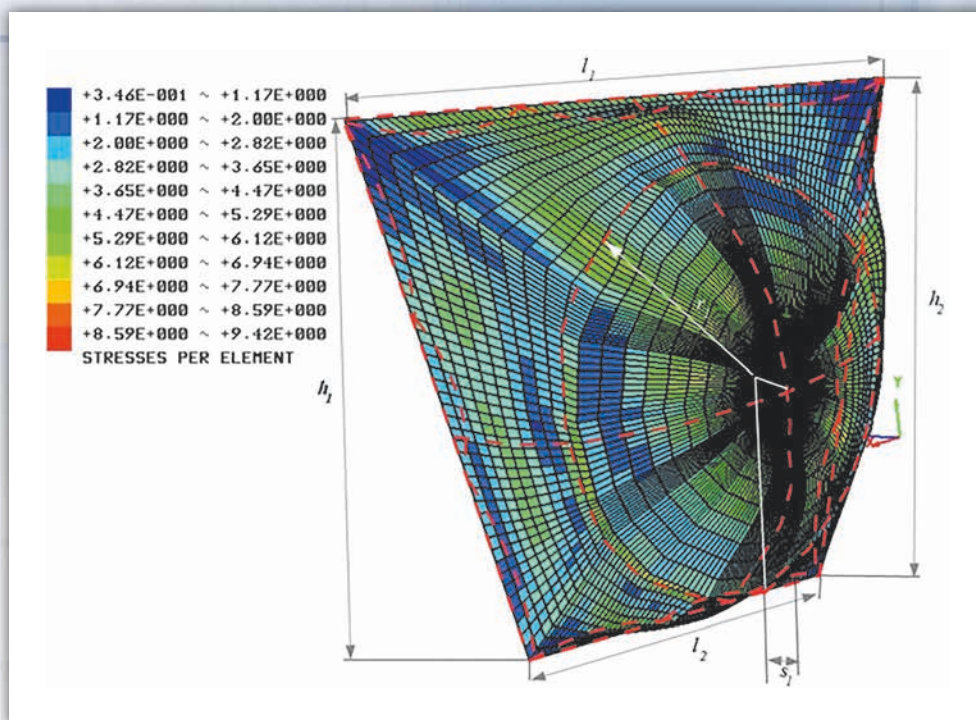


Рис. 12. Геометрическая модель перемычки парашютного типа (типа КПБ):
 l_1 – большая ширина выработки; l_2 – меньшая ширина выработки; h_1 – большая высота выработки; h_2 – меньшая высота выработки;
 r_1 – радиус купола перемычки; s_1 – вылет купола перемычки без (до) воздействия удара взрывной волны /
 Fig. 12. Geometric model of a parachute-type syopping (REAP type): l_1 – large width of the working;
 l_2 – small width of the working; h_1 – large height of the working; h_2 – small height of the working; r_1 – radius of the stopping cone;
 s_1 – extension of the stopping cone without (before) the impact of a shock air wave

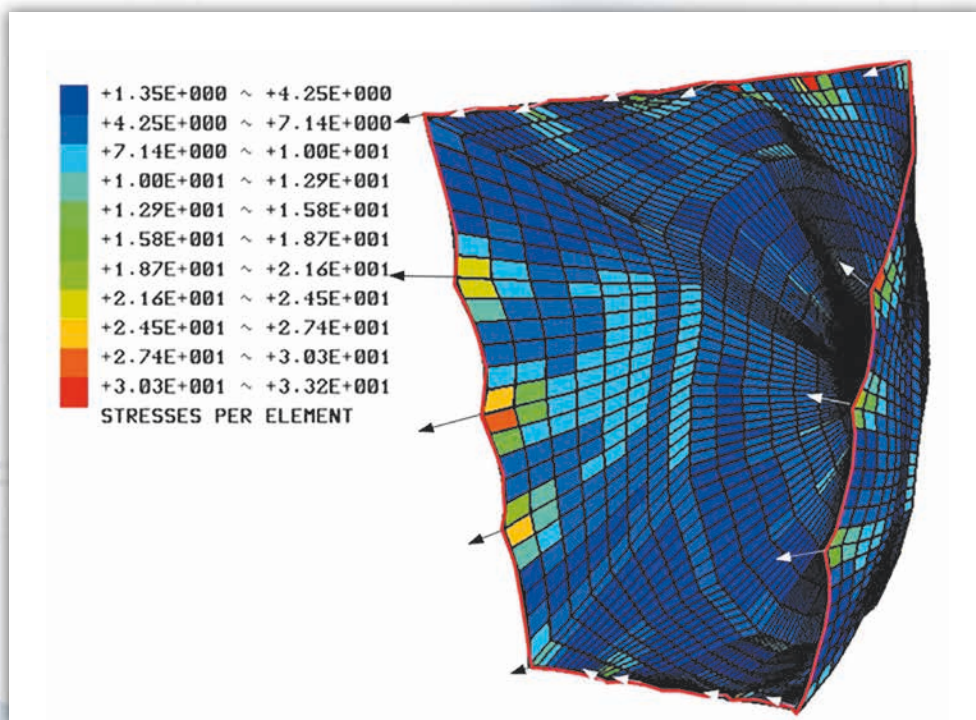


Рис. 13. Модель комплекта противовзрывного быстровозводимого с измененными граничными условиями /
 Fig. 13. REAP model with modified boundary conditions

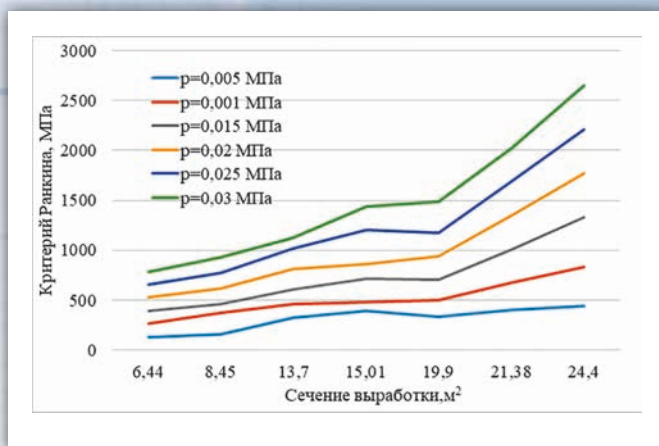


Рис. 14. Сводный график максимальных значений критерия Ранкина /
Fig. 14. Summary graph of maximum values of Rankine criterion

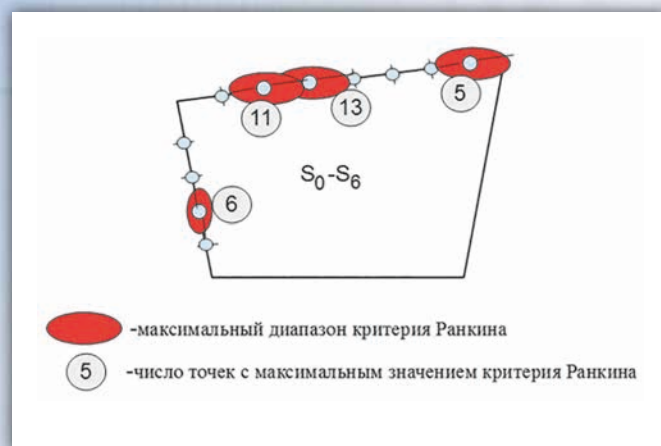


Рис. 15. Сводный вид локализации точек с максимальным значением критерия Ранкина /
Fig. 15. Summary view of points localization with the maximum value of Rankine criterion

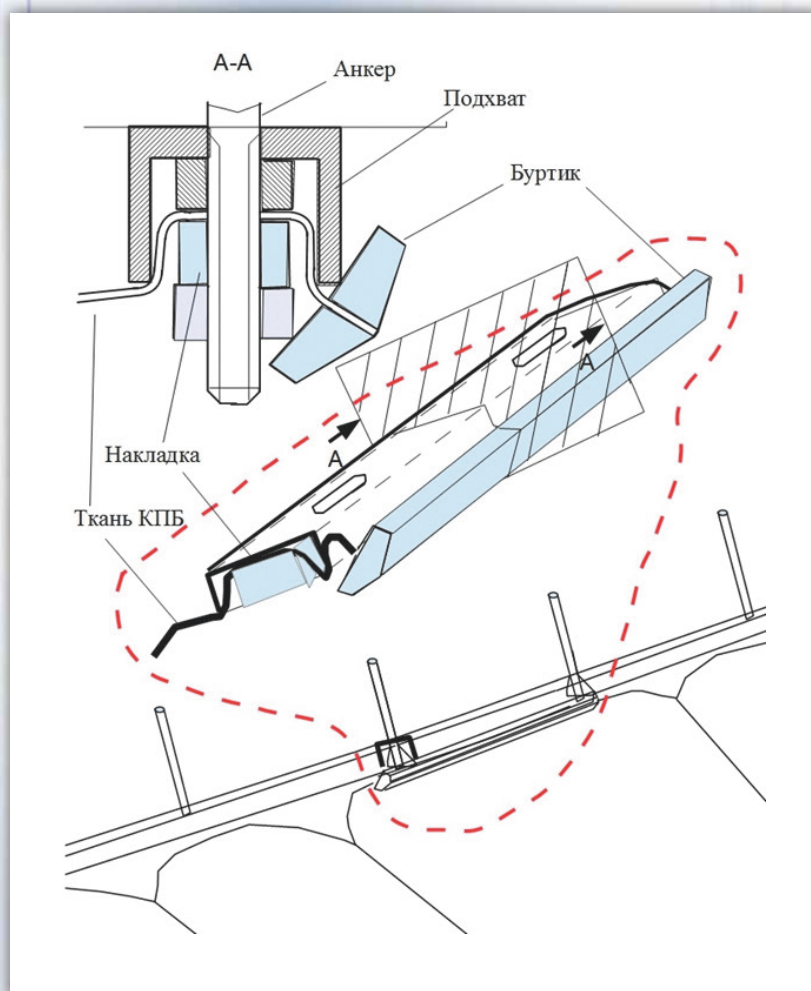


Рис. 16. Схема конструкции дополнительного крепления полотна перемычки за элементы анкерной крепи /
Fig. 16. Scheme of the additional fastening design of the stopping material using the elements of the anchor fastening

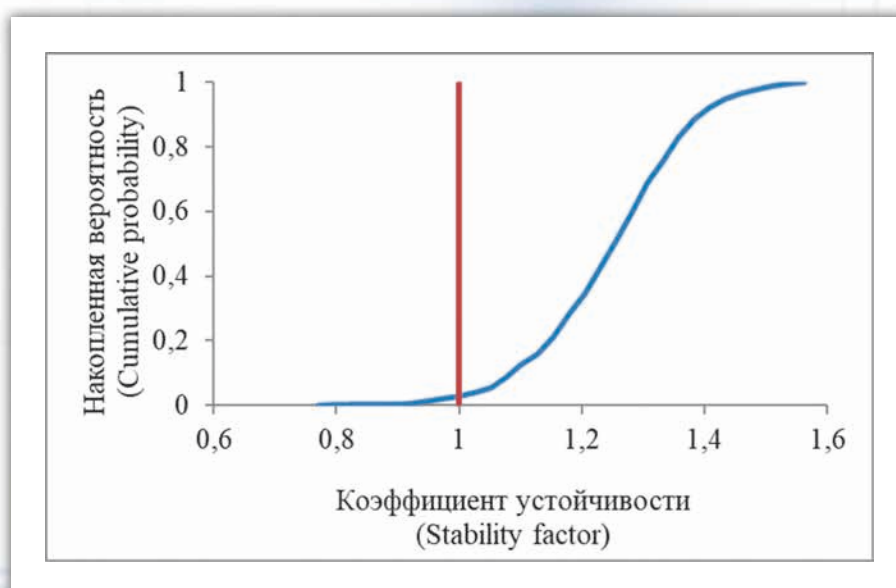
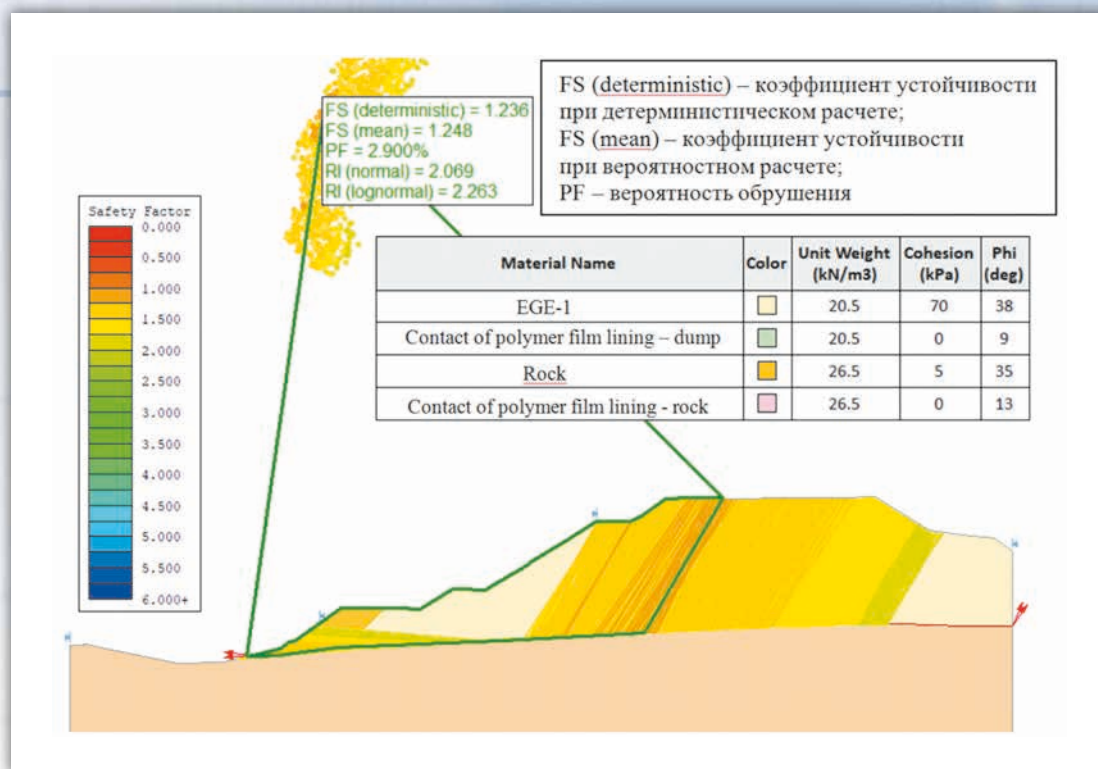


Рис. 4. Оценка риска развития деформаций и нарушения устойчивости откосов отвала полусухих хвостов: а – схема к оценке вероятности реализации прогноза деформирования отвала с учетом пригруза; б – накопленная вероятность (кумулята) превышения коэффициента устойчивости (0,029) /
 Fig. 4. Risk assessment of deformation development and instability of slopes of a semi-dry tailings dump: a – scheme for assessing the probability of the forecast of dump deformation taking into account earth pressure; b – accumulated probability (cumulative curve) of exceeding the stability factor (0.029)



XXXIV Международная специализированная
выставка технологий горных разработок

УГОЛЬ и МАЙНИНГ **РОССИИ**

XVI Международная специализированная выставка

ОХРАНА, БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА И ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

XI Международная специализированная выставка

НЕДРА РОССИИ

VII Специализированная выставка

ПРОМТЕХЭКСПО



МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ:

Выставочный комплекс «Кузбасская ярмарка»,
ул. Автотранспортная, 51, г. Новокузнецк,

т: 8 (800) 500-40-42

2-5 июня
2026



ШИРЕ, ЧЕМ КУЗБАСС!
ГЛУБЖЕ, ЧЕМ УГОЛЬ!

12+

УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ОТВАЛА ПОЛУСУХИХ ХВОСТОВ

С. П. Бахаева[✉], Е. А. Коновалова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово, Российская Федерация
✉ baxaevas@mail.ru

Аннотация: Приведена оценка уровня риска гидродинамической аварии на хвостохранилище методом дерева отказов, результаты инженерных исследований пространственно-временного изменения физико-механических свойств отвала полусухих хвостов кеков цианирования. Установлено, что в результате укладки хвостов тонкими слоями 2–5 м, промораживания их в зимний период и консолидации техногенного массива уменьшилась их влажность, увеличились плотность и прочностные характеристики. Представлен уникальный опыт реализации научно-технических решений по формированию отвала полусухих хвостов на гидроизолированном основании. Реализация этих решений позволила в два раза увеличить общую вместимость отвала, снизить уровень риска гидродинамической аварии за счет исключения негативного влияния гидростатических и гидродинамических сил на дамбу и обеспечить ее устойчивость при сейсмической интенсивности района 8 баллов с коэффициентом устойчивости не ниже нормативного (при вероятности обрушения не больше 2,9 %) за счет выполнения специального мероприятия, позволившего увеличить сопротивление сдвигу вдоль основания отвала.

Результаты исследований и десятилетний опыт эксплуатации отвала полусухих хвостов могут быть полезны проектным и эксплуатирующим организациям при размещении хвостохранилищ на ограниченных площадях в северной климатической зоне.

Ключевые слова: отвал полусухих хвостов, дамба, гидродинамическая авария, уровень риска, дерево отказов, коэффициент устойчивости, вероятность обрушения, вероятный ущерб

Благодарность: Авторы признательны А. В. Зайцеву, техническому директору; В. А. Кошелеву, замдиректора по промышленной безопасности и охране труда; Э. Н. Дроздову, главному маркшейдеру, за помощь в проведении исследований и предоставленные материалы.

Для цитирования: Бахаева С.П., Коновалова Е.А. Управление устойчивостью отвала полусухих хвостов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):53-60. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-53-60>.

SEMI-DRY TAILINGS DUMP STABILITY MANAGEMENT

S. P. Bakhaeva[✉], E. A. Kononova

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University”,
Kemerovo, Russian Federation
✉ baxaevas@mail.ru

Abstract: The article presents an assessment of the risk level of a hydrodynamic accident at a tailings dump using the “fault tree” method, and the results of engineering studies of the spatial-temporal change in the physical and mechanical properties of a dump of semi-dry tailings of cyanidation cakes. It was established that as a result of laying tailings in thin layers of 2 to 5 m, freezing them in the winter period and consolidation of the man-made massif, their humidity decreased, density and strength characteristics increased. The unique experience of implementing scientific and technical solutions for making the dump of semi-dry tailings on an inclined waterproof base is presented. The implementation of those solutions has allowed to double the total dump capacity. The risk level of a hydrodynamic accident has been reduced by eliminating the negative impact of hydrostatic and hydrodynamic forces on the dam. The dam stability has been ensured at a seismic intensity of 8 points in the area with a coefficient greater than the standard (with a probability of collapse of no more than 2.9%) due to a special measure to increase the shear resistance along the base of the dump.

The results of the research and ten years of experience in the operation of a semi-dry tailings dump can be useful to design and operating organizations when placing tailings storage facilities in limited areas in the northern climate zone.

Keywords: semi-dry tailings dump, dam, hydrodynamic accident, risk level, fault tree, stability factor, failure probability, probable damage

Acknowledgments: The authors are grateful to A. V. Zaitsev, Technical Director; V. A. Koshelev, Deputy Director for Industrial Safety and Labor Protection; E. N. Drozdov, Chief surveyor for research assistance and materials provided.

For citation: Bakhaeva SP, Konovalova EA. Semi-dry tailings dump stability management. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):53-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-53-60>.

Введение

На горнопромышленных предприятиях, связанных с эксплуатацией золоторудных месторождений полезных ископаемых, отходы обогащения I–III класса опасности обычно складировать в хвостохранилища, сооружение которых ведет к антропогенному воздействию на больших территориях [4], вызывает опасные гравитационно-геологические процессы и явления [22], требует огромных материальных затрат на строительство и поддержание в надлежащем состоянии ограждающих дамб. В случае разрушения дамбы возникает высокий риск развития гидродинамической аварии, излив хвостов на прилегающую территорию с нанесением экологического [3, 14] и других видов ущерба.

В связи с ограничением площади под размещение хвостохранилища, проектными решениями предусматривалось формирование отвала полусухих хвостов, предназначенного для складирования тонкодисперсных (90 % – класс минус 0,074 мм) кеков цианирования золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ), обезвоженных на фильтр-прессах до влажности 25 %.

Площадка отвала полусухих хвостов включала спланированное гидроизолированное основание, покрытое полимерным (комбинированным, четырехслойным) экраном, для размещения полусухих кеков цианирования, огороженное с нагорной части обваловкой. В нижней части площадки располагался прудок-накопитель для сбора выделяющейся из кеков влаги и атмосферных осадков. Разделение площади, занимаемой отвалом хвостов и прудком-накопителем, выполнено фильтрующей обваловкой, располагаемой на гидроизолированном основании. Собираемая в прудке-накопителе вода с помощью плавающей насосной станции по трубопроводу подавалась в систему оборотного водоснабжения золотоизвлекательной фабрики.

В верхней части площадки отвала полусухих хвостов располагалось здание станции фильтрации кеков цианирования. Подача хвостовой пульпы на станцию фильтрации с ЗИФ осуществлялась по пульповоду. Отфильтрованная вода перекачивалась обратно на ЗИФ по водоводу оборотного водоснабжения. Полусухие кеки выдавались из здания цеха фильтрации ленточным конвейером и складировались в отвал мобильными конвейерами и поворотным стакером-отвалообразователем в верхней части площадки.

В геоморфологическом отношении проектируемый отвал полусухих хвостов располагался на высокой левобережной террасе второго уровня реки Хайкта и на ее склоне. Поверхность территории площадки техногенная (ранее на данном участке производилась отработка россыпного месторождения золота), имела переменный угол наклона от 2° до 5°, в тальвеге лога – около 12°, что обеспечивало сток воды в прудок-накопитель и осушение мелкодисперсных кеков цианирования (рис. 1).

Первоначально эксплуатация первой секции сооружения

проходила в проектном режиме. Однако, когда тангенциальная составляющая веса отвала превысила сопротивление сдвигу по контакту отвала с основанием, в весенний период возникли подвижки намывного массива. По результатам инструментального маркшейдерского мониторинга было обнаружено, что происходит смещение отвала полусухих хвостов вниз по наклонной площадке.

Для оценки состояния отвала, установления причин его смещения и принятия конструктивных решений по снижению риска и размера последствий от гидродинамической аварии были разработаны научно-технические решения, реализация которых позволила предотвратить возникновение аварийной ситуации.

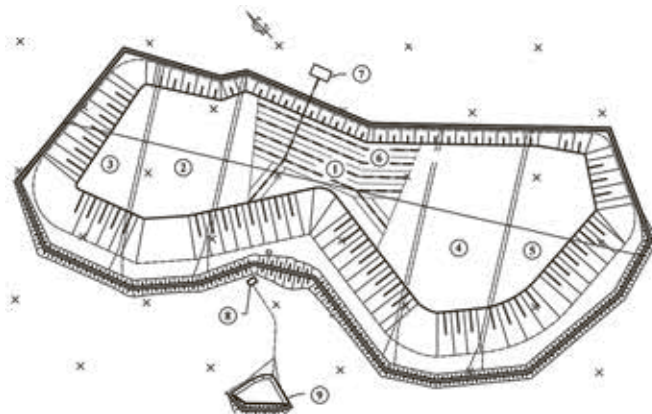


Рис. 1. Проектное положение отвала полусухих хвостов:

- 1 – 1-я секция (1–2-й года); 2 – 2-я секция (3–4-й года);
 - 3 – 3-я секция (4–5-й года); 4 – 4-я секция (6–7-й года);
 - 5 – 5-я секция (7–8-й года); 6 – отвал полусухих хвостов, $V = 7,85$ млн m^3 ,
 - 7 – станция фильтрации кеков цианирования;
 - 8 – станция обезвреживания аварийных сливов; 9 – фильтрующий прудок-отстойник обезвреженных аварийных сливов /
- Fig. 1. Design position of semi-dry tailings dump:
- 1 – 1st section (years 1–2); 2 – 2nd section (years 3–4);
 - 3 – 3rd section (years 4–5); 4 – 4th section (years 6–7);
 - 5 – 5th section (years 7–8); 6 – semi-dry tailings dump, $V = 7.85$ mln. m^3 ; 7 – cyanation cake filtering plant;
 - 8 – overflow treatment plant;
 - 9 – filtering pond for treated overflow

Цель исследований

Изучить пространственно-временную изменчивость физико-механических характеристик полусухих хвостов кеков цианирования и разработать рекомендации по условиям формирования устойчивого отвала на наклонном основании из полимерного экрана.

Материал и методы исследования

Для реализации поставленной цели использовались экспериментальные и теоретические методы исследований: инженерно-геологическое и гидрогеологическое изучение состояния массива полусухих хвостов с бурением скважин на полную мощность отвала, отбором проб грунтов (хвостов)

и лабораторные испытания с определением их физико-механических характеристик; геомеханический мониторинг, включающий инструментальные маркшейдерские наблюдения деформаций ограждающей дамбы; анализ степени риска гидродинамической аварии методом дерева отказов; оценка напряженно-деформируемого состояния системы отвал – основание; анализ риска развития деформаций и нарушения устойчивости отвала.

Оценка уровня риска гидродинамической аварии

На этапе декларирования безопасности введенных в эксплуатацию первой и второй секций расчетом вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии на комплексе ГТС отвала полусухих хвостов, методом дерева отказов выявлены основные виды опасных повреждений ГТС, способные привести к чрезвычайной ситуации (рис. 2); выполнена оценка уровня риска (табл. 1) и последствий гидродинамической аварии.

В результате установлено, что сценарием наиболее тяжелой аварии, имеющей максимальные негативные последствия, является мгновенное разрушение тела дамбы прудка-накопителя первой секции (см. рис. 1) в результате потери устойчивости, истечение потока токсичных отходов в нижний бьеф и распространение их по прилегающей территории.

Уровень безопасности оценивался как пониженный, уровень риска аварии – условно приемлемый (1), вероятность возникновения аварии по расчетному значению коэффициента риска составила $P_a = 0,0051$ (табл. 1).

В соответствии с требованиями «Методических рекомендаций...» [25] вероятность возникновения аварии оценивалась по расчетному значению коэффициента риска $r_a = v \cdot \lambda$:

$$P_a = 0,5 \cdot \operatorname{erfc} \cdot \left(\beta \frac{\ln \left(\frac{r_a}{r_k} \right)}{\ln \left(\frac{r_{\text{доп}}}{r_k} \right)} \right), \quad (1)$$

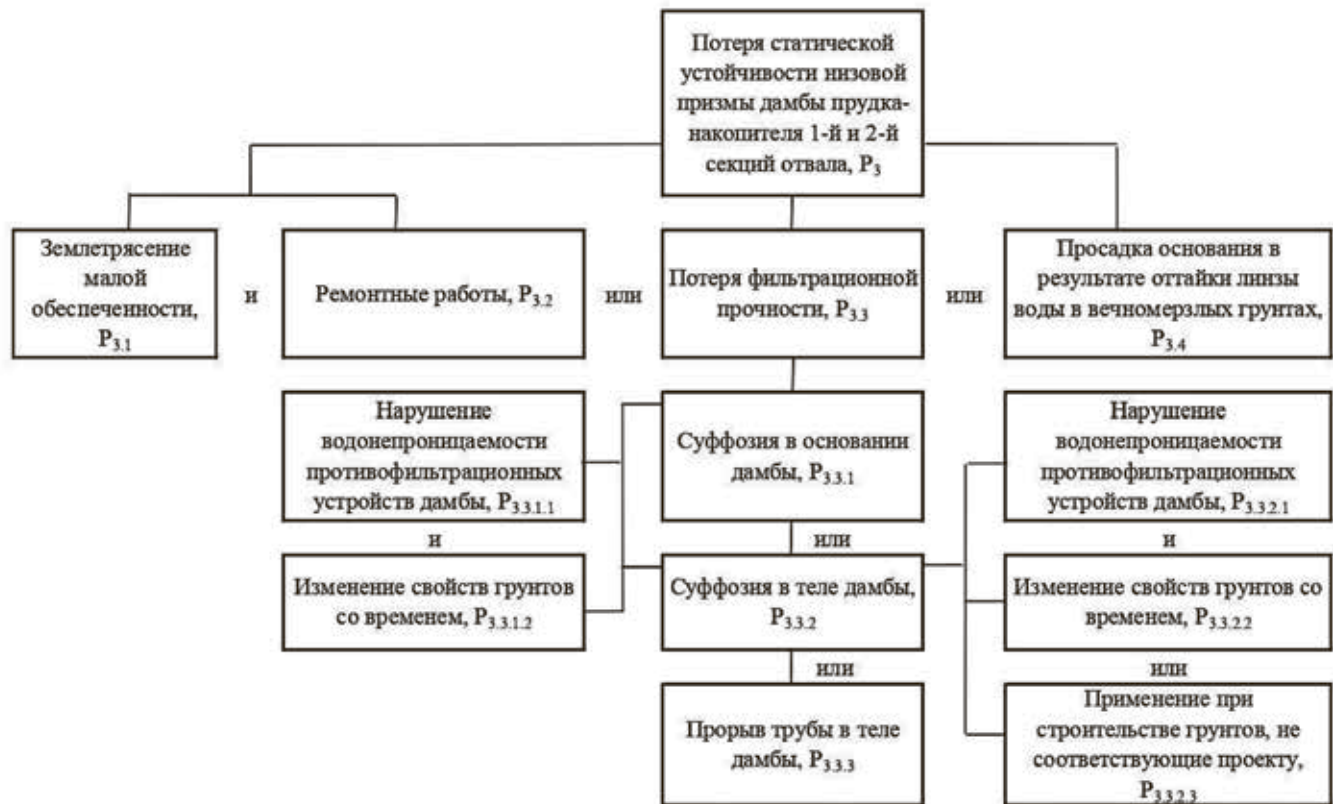


Рис. 2. Дерево отказов дамбы прудка-накопителя 1-й и 2-й секций отвала / Fig. 2. “Fault tree” for containment pond dam of the 1st and 2nd sections of the dump:

P_3 – loss of static stability of downstream dam of the containment pond at the 1st and 2nd sections of the dump, $P_{3.1}$ – Earthquake of low probability, $P_{3.2}$ – Repair work, $P_{3.3}$ – Loss of seepage strength, $P_{3.3.1}$ – Seepage failure at the dam foundation, $P_{3.3.1.1}$ – Damage of the watertightness of the dam anti-seepage devices, $P_{3.3.1.2}$ – Changes in soil properties over time, $P_{3.3.2}$ – Seepage failure in the dam body, $P_{3.3.2.1}$ – Damage of the watertightness of the dam anti-seepage devices, $P_{3.3.2.2}$ – Changes in soil properties over time, $P_{3.3.2.3}$ – Use of soils in construction that do not correspond to the design, $P_{3.3.3}$ – Pipe burst in the dam body, $P_{3.4}$ – Subsidence of the foundation as a result of thawing of the water lens in permafrost soils

Таблица 1 / Table 1

Оценка уровня риска аварии / Accident risk level assessment

Интегральный код (Integral code of)		Коэффициент (Coefficient)			Уровень безопасности (Safety level)	P_a , 1/год	Уровень риска аварии ГТС (HS accident risk level)
опасности аварии ГТС (HS accident hazard)	уязвимости ГТС (HS vulnerability)	λ	ν	r_a			
1 123	1 210	0,5313	0,3167	0,17	Пониженный (Low)	0,0051	Условно приемлемый (Conditional acceptable)

где r_k – катастрофическое значение коэффициента риска ($r_k = 1$); $r_{доп}$ – допустимое значение коэффициента риска, при превышении которого не будет обеспечен нормальный уровень безопасности ГТС ($r_{доп} = 0,15$); β – коэффициент вероятности, зависящий от класса гидротехнического сооружения (для IV класса, $\beta = 1,95$); $\operatorname{erfc}x$ – вероятностная функция (по формуле (2), $x = 1,82$).

$$\operatorname{erfc}x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx. \quad (2)$$

При мгновенном разрушении тела дамбы и средней скорости движения 4,3 м/с поток мог достигнуть русла реки Хайкта, расположенной в 500 м от накопителя, через две минуты. При этом общий размер вероятного вреда в ценах 2010 года составлял 237 млн рублей (663 млн рублей – в ценах 2025 года).

Нарушение устойчивости отвала полусухих хвостов

В силу разнообразия видов отходов горнодобывающей промышленности [20], особенностей их инженерно-геологических свойств [21] и воздействия на окружающую среду [1, 10, 16] различными аспектами мониторинга этих объектов с целью снижения риска возникновения аварий и их поражающих факторов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду, занимаются специалисты различного профиля: горные инженеры [7, 15], геологи и гидрогеологи [8, 11], гидротехники [2], экологи [4, 14], предлагающие проведение комплексных видов мониторинга в течение всего времени эксплуатации сооружений [12].

Для анализируемого здесь отвала полусухих хвостов от начала его формирования вдоль гребня ограждающей дамбы, со стороны низового откоса на участке напорного фронта, были заложены рабочие реперы наблюдательной станции. Конструкция рабочих реперов – металлические стержни диаметром 3 мм, с резьбой в верхней части для закрепления постоянных отражательных призм.

Маркшейдерской службой рудника был организован инструментальный мониторинг. Наблюдения велись точным электронным тахеометром 5Та5 со стационарной станции в виде жестко закрепленного в нижнем бьефе металлического штатива, что позволяло исключать влияние погрешностей центрирования и измерения высоты инструмента и отражателя.

Погрешность положения наиболее удаленного репера, отстоящего от станции на расстоянии 550 м, не превышала в плане 6,65 мм (3), по высоте – 5,66 мм (5).

$$m_p = \pm \sqrt{\frac{m_B^2}{\rho^2} l^2 + m_l^2}, \quad (3)$$

$$m_l = \pm (5 + 3 \cdot 10^{-6} d), \quad (4)$$

$$m_h^2 = m_l^2 \sin^2 \delta + \frac{m_B^2}{\rho^2} l_n^2 \cos^2 \delta + m_k^2 \frac{4d^2}{R^2}, \quad (5)$$

где m_B – средняя квадратическая погрешность (СКП) измерения угла ($m_B = 5''$); ρ – коэффициент для перехода из градусной меры в радианную ($\rho = 206265$); l – наклонная длина от инструмента до отражателя, мм; m_l – СКП измерения длин линий, мм, при измерении электронным тахеометром 5Та5 определяется по формуле (4); d – горизонтальное проложение, км;

m_δ , m_k – средние квадратические погрешности, обусловленные соответственно погрешностями измерения угла наклона ($m_\delta = 5''$), коэффициента рефракции (максимальное значение средней квадратической погрешности коэффициента рефракции при измерении углов наклона в начале и в конце дня – $m_{k\max} = \pm 0,03d^2/R$); δ – угол наклона ($\delta_{\max} = 15^\circ$), – наклонная длина; R – радиус Земли ($R = 6370$ км).

В первые месяцы наблюдались оседания реперов, график оседаний имел затухающий характер от 10 до 1 мм/сут, что было связано с уплотнением пород тела дамбы. Согласно журналу маркшейдерских наблюдений, полное затухание фильтрационно-деформационных процессов в намывном массиве завершилось через 100 дней, что согласуется с подобными исследованиями горного института КНЦ РАН [6]. В последующие годы деформации по реперам, установленным по гребню дамбы, не выявлялись. Однако на третий год эксплуатации, в весенний период, при визуальном обследовании в районе секции № 1 на поверхности верхнего яруса отвала (на расстоянии 3–4 м от бровки откоса) были обнаружены трещины криволинейного очертания с шириной раскрытия 10–15 см. Вторая линия трещин располагалась на расстоянии 7–8 м от бровки, ширина раскрытия составляла 30–40 см, видимая глубина – до 1 м. Более мелкие трещины наблюдались практически на всей поверхности отвала, возникли подвижки отвала в статическом режиме. Важно было предотвратить динамический процесс, так как в этом случае тело оползня приобретает кинетическую энергию: силам трения, которые стремятся остановить движение оползня, противопоставляется не только сила тяжести, но и инерциальные силы движущейся массы [5]. Формирование первой секции отвала было остановлено, работы переведены на вторую секцию, и принято решение о проведении исследований для оценки напряженного состояния системы отвала – основание первой секции, максимальная высота намытых хвостов составляла на тот момент 31 м.

В приоткосной части отвала в пределах призмы возможного обрушения были заложены дополнительные рабочие реперы. Инструментальными маркшейдерскими наблюдениями зафиксировано медленное смещение (со скоростью 1,5 мм/сутки) отвала хвостов в сторону прудка. Направление векторов смещений в плане коррелировало со склоном рельефа основания отвала.

Инженерные исследования отвала полусухих хвостов

Полевыми инженерно-геологическими и гидрогеологическими исследованиями (бурением скважин на полную мощность с отбором кернов сформированного отвала полусухих хвостов (метасоматиты переизмельченные, темно-серого цвета) с замерами уровня грунтовых вод, выполненными в 2013 году) установлено: техногенный горизонт подземных вод не встречен, влажность верхнего слоя (до 7 м) достигает 34 %, с глубиной (от поверхности отвала) влажность уменьшается: в срединной части равна 17–19 %, на контакте с основанием – 22 %. Высокая влажность верхних слоев связана с дополнительным водонасыщением хвостов атмосферными осадками. Мерзлые грунты обнаружены на всей территории отвала, глубина промерзания изменялась от 1,5 до 13 м, такой диапазон промерзания связан с календарными сроками складирования хвостов в отвал. По результатам лабораторных испытаний хвостов на одноплоскостной срез и трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме установлены прочностные характеристики: угол

внутреннего трения – $31\text{--}37^\circ$; сцепление – $0,003\text{--}0,009$ МПа, а также плотность – $1,88\text{--}2,14$ т/м³.

Расчетный коэффициент устойчивости отвала (1,05) по полученным при лабораторных испытаниях физико-механическим характеристикам грунтов отвала оказался меньше нормативного значения (1,2). Вероятность мгновенного разрушения тела дамбы прудка-накопителя увеличивалась. В этой связи возникла необходимость разработки научно-технических решений по обоснованию безопасности отвала полусухих хвостов, которые кардинально меняли технологию формирования отвала.

После реализации научно-технических решений в 2016 году проведены повторные инженерно-геологические исследования грунтов отвала (пробурено пять скважин с отбором проб через два метра по глубине), по результатам которых установлено, что за три года эксплуатации отвала в результате консолидации техногенного массива улучшились его характеристики, влияющие на устойчивость, что совпадает с результатами исследований других ученых [23].

Улучшенные характеристики, влияющие на устойчивость отвала:

- влажность хвостов значительно уменьшилась и от поверхности к основанию отвала составляла $25\text{--}11\text{--}22\%$;
- плотность и прочностные характеристики увеличились в $1,2\text{--}1,5$ раза;
- большая часть хвостов оказалась в замороженном состоянии.

Для рекомендуемого нами контура отвала расчетный коэффициент устойчивости (1,25) системы отвал – основание, рассчитанный по результатам инженерно-геологических и гидрогеологических исследований 2016 года, оказался больше нормативного значения (1,20).

Научно-технические решения по формированию отвала

Суть научно-технических решений, основанных на многократных оценках устойчивости системы отвал – основание, заключалась в следующем:

1. В нижней части площадки под размещение полусухих хвостов поверх противофильтрационного полимерного экрана отсыпать фильтрующую дамбу из глыбовых скальных очень прочных ($R_c > 120$ МПа) пород вскрыши карьера. Ширина по гребню должна быть достаточной для проезда и разворота автосамосвалов.
2. Организовать автотранспортную доставку хвостов (автомобилем «БелАЗ-7547» грузоподъемностью 42 т), подаваемых с конвейера станции фильтрации в кузов автосамосвала и бульдозерную («Cat D-6L» фирмы Катерпиллер) раскладку хвостов по площади третьей секции отвала (рис. 3).
3. Формирование отвала производить бульдозером от фильтрующей дамбы вверх по склону по всей площадке секции небольшими слоями по $2\text{--}5$ м с тщательным уплотнением колесным транспортом.
4. При достижении поверхностью отвала отметки гребня фильтрующей дамбы производить очередное наращивание фильтрующей дамбы и отсыпку следующего слоя хвостов производить также снизу (от фильтрующей дамбы) вверх.
5. Предусмотреть на площадке подъездные автодороги к станции фильтрации кеков цианирования, станции и установкам оборотного водоснабжения и обезвреживания аварийных сливов, прудкам-накопителям, емкости оборотных растворов.

6. Обеспечить ширину ($6\text{--}8$ м) гребня дамб и обваловок, позволяющую в случае необходимости движение по ним автотранспорта и землеройной техники для производства ремонтных работ.

7. Для снижения динамических нагрузок постоянное движение транспорта по гребню дамб и обваловок запретить.

8. От поверхностного дождевого стока площадку отвала защитить кюветом существующей автодороги, проходящей выше по рельефу над площадкой отвала полусухих хвостов, выполняющим функции нагорной канавы.

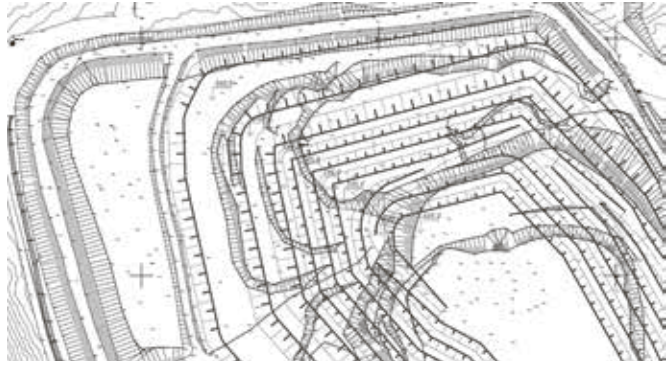


Рис. 3. Схема формирования третьей секции отвала полусухих хвостов в соответствии с научно-техническими решениями /
Fig. 3. Scheme of the 3rd section formation at the semi-dry tailings dump in accordance with scientific and technical solutions

Расчетами устойчивости отвала полусухих хвостов с учетом результатов инженерно-геологических исследований, выполненных в 2016 году, обоснована возможность увеличения высоты отвала с отметки 580 м до отметки 605 м.

Реализация научно-технических решений по обоснованию безопасности отвала полусухих хвостов обеспечила:

- увеличение общей вместимости отвала кеков с $7,85$ млн м³ (по первоначальному проекту) до $16,52$ млн м³ (по проекту технического перевооружения, реализующего научно-технические решения по формированию отвала);
- снижение уровня риска гидродинамической аварии за счет сокращения объемов воды в отстойном прудке, которая в зимний период промораживалась с хвостами, в летний – испарялась за счет распределения хвостов на большой площади;
- исключено негативное влияние гидродинамических и гидростатических сил, которые являются основными разрушающими факторами, действующими на ограждающие дамбы [17].

Дальнейшее наращивание отвала до отметки 605 м под генеральным углом $17\text{--}18^\circ$ производилось ярусами, отсыпаемыми под углом естественного откоса – 33° по 10 м до горизонта 580 м и по 5 м до горизонта 605 м. Для обеспечения генерального угла наклона отвала между отсыпаемыми ярусами оставлялись бермы, ширина которых рассчитывалась из условия устойчивости отвала.

При достижении поверхностью отвала конечной отметки 605 м оставшуюся воду из отстойного пруда откачали с помощью насосных установок и заполнили емкость скальной вскрышной породой, измельченной до фракции $60\text{--}100$ мм. Таким образом возникновение гидродинамической аварии, способной привести к чрезвычайной ситуации (ущерб окружающей среде), исключалось в связи с отсутствием в емкостях воды. Вероятность возникновения аварии $P_a = 0$ событий в год (табл. 2).

Вместе с тем появилась необходимость оценки риска развития деформаций и нарушения устойчивости откосов отвала полусухих хвостов кеков цианирования, высота которого на этапе его консервации достигла 80 м.

Анализ риска развития деформаций и нарушения устойчивости отвала

Анализ риска развития деформаций и нарушения устойчивости отвала полусухих хвостов на этапе его консервации в 2022 году произведен по методике для опасных производственных объектов и включал:

- идентификацию опасностей;
- оценку частоты, частости и накопленной частости (вероятности);
- последствий в случае деформаций анализируемого сооружения для здоровья, жизни людей, имущества и окружающей природной среды.

Оценке риска развития деформаций при фактическом положении отвала предшествовали многократные расчеты устойчивости откосов, выполненные методом итерации с использованием теорий предельного равновесия, алгебраического и векторного сложения сил.

Критерием безопасности отвала полусухих хвостов является расчетный коэффициент устойчивости, который обуславливается отношением гравитационных и тангенциальных сил, действующих в теле отвала полусухих хвостов и сил сопротивления сдвигу по наклонному контакту в виде полимерного экрана.

При сейсмической интенсивности района 8 баллов по шкале MSK-64 (карта С) общего сейсмического районирования ОСП-2015 (СП 14.13330.2018) оценка напряженно-деформированного состояния выполняется на базе гибридного моделирования [9, 24], пространственной конечно-элементной модели [13], методом конечных элементов [19], а также по расчетному коэффициенту устойчивости:

$$n = \frac{\sum[(P_i \cos \alpha_i - Q_i \sin \beta_i) \operatorname{tg} \varphi_i + C_i l_i]}{\sum(P_i \sin \alpha_i - Q_i \cos \beta_i)} \quad (6)$$

$$Q_i = K_0 \cdot K_1 \cdot P_i \cdot k_c, \quad (7)$$

где P_i – вес блока, мН; α_i – угол наклона основания в блоке, град.; Q_i – сейсмическая сила, мН; β_i – угол между поверхностью скольжения и направлением сейсмической силы, измеренный в вертикальной плоскости, град.; φ_i – угол внутреннего трения грунта в блоке, град.; $C_i l_i$ – силы сцепления, направленные параллельно соответствующим границам блоков, мН; K_0 – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность (для отвалов $K_0 = 1,0$); K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений (для откосов отвалов $K_1 = 0,12$); k_c – коэффициент сейсмичности, который представляет собой значения ускорения колебаний в долях ускорения свободного падения g ($k_c = 0,05$).

Анализ результатов расчета коэффициента устойчивости по восьми сечениям показал, что наиболее напряженный участок расположен с юго-западной стороны, минимальный расчетный коэффициент устойчивости здесь составил 1,15, что меньше нормативного значения 1,20.

В качестве мероприятия по увеличению сопротивления сдвигу вдоль основания отвала были рассчитаны параметры пригрузки из скальной вскрышной породы карьера, который формировался под углом естественного откоса 34–35°, шириной по гребню 20–25 м до уровня бермы между первым и вторым ярусами (ориентировочно до отметки 570 м).

Проверочными расчетами установлено, что в этом случае при нормативном 1,20 расчетный коэффициент устойчивости отвала составит: для детерминистического подхода FS (deterministic) – 1,236; вероятностного FS (mean) – 1,248. Вероятность обрушения (PF) откосов отвала полусухих хвостов, сформированного до отметки 605 м (80 м), не превысит 2,9 % (рис. 4) (см. цв. вклейку на стр. 51).

Выводы

1. Важнейшей составляющей в обеспечении безопасных условий эксплуатации хвостохранилищ является комплексный геомеханический мониторинг, включающий визуальные

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчета вероятного вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнических сооружений отвала полусухих хвостов / Results of calculation of probable harm that may be caused to life, health of individuals, property of individuals and legal entities as a result of an accident at hydraulic structures of the semi-dry tailings dump

Параметр (Parameter)	Год расчета вероятного вреда от гидродинамической аварии (Year of calculation of probable damage from a hydrodynamic accident)			
	2010 (1-я и 2-я секции) (section 1 and 2)	2013 (3-я секция) (section 3)	2016 (комплекс) (complex)	2021 (комплекс) (complex)
Уровень безопасности (Safety level)	Пониженный (low)	Нормальный (normal)	Нормальный (normal)	Нормальный (normal)
Уровень риска (Risk level)	Условно приемлемый (conditional acceptable)	Приемлемый (acceptable)	Приемлемый (acceptable)	Приемлемый (acceptable)
Вероятность, событий в год (Probability, events per year)	$1,05 \times 10^{-2}$	$1,52 \times 10^{-3}$	$1,34 \times 10^{-3}$	10^{-6}
Ущерб, тыс. руб. ¹ (Damage, thousand Rub. ²)	663 086	600 019	605 343	0

¹Пересчет ущерба вероятного вреда от гидродинамической аварии в цены 2025 года выполнен с помощью инфляционного калькулятора на сайте: <https://уровень-инфляции.рф>.

наблюдения и инструментальный маркшейдерский контроль напряженно-деформированного состояния отвала полусухих хвостов. Организация мониторинга от начала формирования хвостохранилища позволила на ранней стадии обнаружить первые признаки нарушения устойчивости системы отвал – основание и разработать научно-технические решения, позволившие предотвратить развитие деформаций на ранней стадии.

2. Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования тела отвала в период его эксплуатации показали, что при складировании хвостов формируется сложная неоднородная структура техногенного массива, происходит существенное изменение прочностных характеристик пород и степени его обводнения, поэтому немаловажно определять физико-механические свойства хвостов с учетом времени консолидации. При этом основное влияние на улучшение упомянутых характеристик оказала технология формирования отвала, позволяющая обеспечить дренаж полусухих хвостов и их консолидацию. Результаты наших исследований совпадают с выводами, полученными другими учеными на подобных сооружениях [8], [20] и [24].

3. Реализация научно-технических решений по формированию отвала полусухих хвостов позволила изменить:

- уровень безопасности сооружения от пониженного до нормального;
- уровень риска гидродинамической аварии от условно приемлемого до невероятного (настолько невероятного, что может быть исключен из рассмотрения [18]);
- вероятность события от $1,05 \times 10^{-2}$ до 10^{-6} ;
- вероятный ущерб от гидродинамической аварии с 605 млн рублей до нуля (табл. 2);
- общую вместимость отвала с 7,85 млн м³ (по первоначальному проекту) до 16,52 млн м³ (по проекту технического перевооружения), разработанному проектной организацией согласно нашим научно-техническим рекомендациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- 1.Артемова ОС, Язовцева АМ. Оценка предотвращенного эколого-экономического ущерба при решении проблем на Джидинском вольфрам-молибденовом комбинате. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010;11. [Artemova OS, Yazovtseva AM. Assessment of prevented ecological and economic damage when solving problems at the Dzhibida tungsten-molybdenum plant. *Mining information and analytical bulletin*. 2010;11 (In Russ.)]
- 2.Беллендир ЕН, Филиппова ЕА, Буряков ОА и др. Специфика оценки состояния и управление безопасностью высоких намывных отвалов. *Гидротехническое строительство*. 2015;4. [Bellendir EN, Philippova EA, Buryakov OA, et al. Specifics of condition assessment and safety management of high reclaimed waste dumps. *Hydrotechnical construction*. 2015;4 (In Russ.)]
- 3.Гальперин АМ, Кутепов ЮИ, Круподеров ВС. Инженерно-геологическое обеспечение формирования и последующего использования отвальных массивов на горных предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;1:20-1. [Galperin AM, Kutepov YuI, Krupoderov VS. Engineering and geological support for the formation and subsequent use of waste mass at mining enterprises. *Mining information and analytical bulletin*. 2015;1:20-1 (In Russ.)]
- 4.Еременко ЕА, Фузеина ЮН, Ворошилов ЕВ и др. Антропогенная трансформация рельефа Воркутинского промышленного района. *Вестник Московского университета*. 2021;1:3-13 [Eremenko EA, Phuzeina YuN, Voroshilov EV, et al. Anthropogenic transformation of the relief of the Vorkuta industrial region. *Bulletin of the Moscow University*. 2021;1:3-13 (In Russ.)]
- 5.Захаров ВН, Малинникова ОН, Трофимов ВА и др. Оценка устойчивости оползневого склона и развития его деформаций во времени. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014;6:11-22 [Zakharov VN, Malinnikova ON, Trofimov VA, et al. Assessment of the stability of a landslide slope and the development of its deformations over time. *Physical and technical problems of mining development*. 2014;6:11-22 (In Russ.)]
- 6.Калашник НА. 4D-моделирование консолидации грунтов хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК». *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019;11(4):10-5. [Kalashnik N.A. 4D modeling of soil consolidation of the tailings storage facility of JSC Kovdorsky GOK. *Bulletin of Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;11(4):10-5. (In Russ.)]
- 7.Ковлеков ИИ. Безопасность гидротехнических сооружений при эксплуатации месторождений на Севере. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;7:154-63. [Kovlekov II. Safety of hydraulic structures during the exploitation of deposits in the north. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;7:154-63 (In Russ.)]
- 8.Кутепов ЮИ, Кутепова НА, Сергина ЕВ. Изменение напряженного состояния и физико-механических свойств намывных пород при формировании горных природно-технических систем. *Сергеевские чтения: Материалы годичной сессии научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии*. Москва, 2014. [Kutepov YuI, Kutepova NA, Sergina EV. Changes in the stress state and physical and mechanical properties of alluvial rocks during the formation of mountain natural and technical systems. *Sergeevskie chteniya. Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. Moscow, 2014 (In Russ.)]
- 9.Лолаев АБ, Бадоев АС, Оганесян ЭХ и др. Повышение устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища при ее эксплуатации. *Хронос*. 2019;6(33):57-61. [Lolaev AB, Badoev AS, Oganesyanyan EH, et al. Increasing the stability of the tailings dam during its operation. *Chronos*. 2019;6(33):57-61 (In Russ.)]
- 10.Маковозова ЗЭ, Аксенова МА, Кесвани Ч и др. Вопросы оценки влияния опасных экзогенных процессов на устойчивость природнотехногенных систем на примере Фиагонского хвостохранилища. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;7:76-86 [Makovozova ZE, Aksenova MA, Kesvani Ch, et al. Issues of assessing the impact of hazardous exogenous processes on the stability of natural and man-made systems using the example of the Fiagdon tailings dump. *Mining information and analytical bulletin*. 2023;7:76-86 (In Russ.)]
- 11.Максимов ДА. Влияние фильтрационных нарушений на уровень фильтрующихся вод и состояние насыпного гидротехнического сооружения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;5-1:280-91. [Maksimov DA. The influence of filtration disturbances on the level of filtered waters and the state of the embankment hydraulic structure. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;5-1:280-91 (In Russ.)]
- 12.Поспехов ГБ, Кондакова ВН, Кутепова НА. Обоснование методологии мониторинга состояния объектов складирования отходов углеобогаительных предприятий. *Маркшейдерия и недропользование*. 2022;5(121). [Pospekhov GB, Kondakova VN, Kutepova NA. Justification of the methodology for monitoring the state of waste storage facilities of coal preparation plants. *Mine surveying and subsoil use*. 2022;5(121) (In Russ.)]
- 13.Сайидкосимов СС, Раимжанов БР, Умаров ФЯ и др. Прогнозная оценка напряженно-деформированного состояния дамб хвостохранилищ на базе пространственной конечно-элементной модели. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;9:38-55. [Sayyidkosi-

symov SS, Raimzhanov BR, Umarov FYa, et al. Predictive assessment of the stress-strain state of tailings dams based on a spatial finite element model. *Mining information and analytical bulletin*. 2023;9:38-55 (In Russ.)]

14. Хохлачев АВ, Рыбников ПА, Цейтлин ЕМ, Коновалов и др. Использование интегрального показателя экологического риска для обоснования природоохранных решений в условиях неопределенности на примере накопителей жидких промышленных отходов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;11-1:71-89. [Khokhryakov AV, Rybnikov PA, Tseitlin EM, et al. Using an integrated indicator of environmental risk to justify environmental decisions under conditions of uncertainty using the example of liquid industrial waste storage facilities. *Mining information and analytical bulletin*. 2021;11-1:71-89 (In Russ.)]

15. Ческидов ВВ. Гидрогеомеханический мониторинг состояния откосных сооружений. *Горная промышленность*. 2017;4(134):78-80. [Cheskidov VV. Hydrogeomechanical monitoring of the state of slope structures. *Mining industry*. 2017;4(134):78-80 (In Russ.)]

16. Чяснавичус Ю. Анализ поражающих факторов, возникающих в результате аварии на хранилищах жидких отходов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;9:299-302. [Chyasnavichyus Yu. Analysis of damaging factors arising from accidents at liquid waste storage facilities that have a negative impact on the environment. *Mining information and analytical bulletin*. 2012;9:299-302 (In Russ.)]

17. Шарипов ДШ. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ. *Науки о Земле и недропользование*. 2021;44(1):63-72. [Sharipov DSh. Hydrodynamic and hydrostatic forces as factors affecting the stability of tailings storage facilities. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2021;44(1):63-72 (In Russ.)]

18. Шевченко ЛА, Поздняков АН. Методика оценки комплексного риска возникновения аварий, инцидентов, несчастных случаев и экологического ущерба на опасных производственных объектах электроэнергетики на примере ОАО «Южно-Кузбасская ГРЭС». *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2014;1(101). [Shevchenko LA, Pozdnyakov AN. Methodology for assessing the complex risk of accidents, incidents, accidental injuries and environmental damage at hazardous production facilities in the electric power industry using the example of Yuzhno-Kuzbasskaya GRES OJSC. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2014;1(101) (In Russ.)]

19. Bessimbayeva OG, Khmyrova EN, Oleinikova EA, et al. Simulation of ash dump embankment stability. *Mining Science and Technology*. 2023;8(4):303-12.

20. Kondakova VN, Pankratova KV, Pomortseva AA, et al. Analysis of the problem of classification of mining wastes. *Engineering and Mining Geophysics*. 2020;2020:1-8.

21. Kutepova NA, Moseykin VV, Kondakova VN, et al. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *Mining Information and Analytical Bulletin* (Scientific and Technical Journal). 2022;12.

22. Kutepov YuI, Kutepova NA, Kutepov YuYi, et al. Engineering-geological and geoeccological aspects of formation of dry dumps on hydrodumps. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;938:012007.

23. Lolaev A, Oganessian A, Badoev A, et al. The algorithm of a geotechnical massif forming considering the consolidation time and network planning method. *Proceedings of 2-nd Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG)*. Sousse, Tunisia, 2019.

24. Lolaev A., Oganessian A., Badoev A., Oganessian E. *Proceedings of 3-rd Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG)*. Sousse, Tunisia, 2020.

25. Методические рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водного хозяйства и промышленности, 2-е изд. Разработаны авторским коллективом сотрудников ОАО «НИИ ВОДГЕО» и ЗАО «ДАР/ВОДГЕО». Москва, 2009. [Methodological recommendations for assessing the risk of accidents at hydraulic structures in water management and industry, 2nd edition. Developed by a team of authors from the Research Institute VODGEO and DAR/VODGEO. Moscow, 2009 (In Russ.)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Светлана Петровна Бахаева –

доктор технических наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. 650000, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: baxaevas@mail.ru

Екатерина Александровна Коновалова –

преподаватель, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, Российская Федерация, e-mail: konovalovaea@kuzstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Svetlana P. Bakhayeva –

Dr. Sci. (Eng.), Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: baxaevas@mail.ru

Ekaterina A. Konovalova –

lecturer, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: konovalovaea@kuzstu.ru

Критерии авторства / Contribution: Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

Конфликт интересов / Conflict of interest: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье Поступила в редакцию: 05.05.2025.

Поступила после рецензирования: 07.06.2025.

Принята к публикации: 17.06.2025.

Article info Received: 05.05.2025.

Revised: 07.06.2025.

Accepted: 17.06.2025.

АКТИВАЦИЯ, РЕГЕНЕРАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ОТРАБОТАННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. А. Иодис✉

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

✉ iodisva@mail.ru

Аннотация: Приведен анализ исследований по активации, регенерации и переработке отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия. Исследование показало, что ультразвуковая обработка отработанных катализаторов действительно позволяет проводить их активацию и регенерацию посредством удаления поверхностных отложений, пленок и диспергации частиц катализаторов. Сравнение способов, использующих ультразвук, с традиционными способами очистки катализаторов показало существенное сокращение продолжительности процессов, рост степени очистки, рентабельность восстановления. Эффекты использования ультразвука – кавитация, радиационное давление, акустические потоки с частотами 20–22, 30, 35, 37, 80 кГц, интенсивностями до 10 Вт/см² в процессе кислотного, бактериально-химического выщелачивания отработанных катализаторов, благодаря разрушению оксидных пленок и загрязнений, удалению поверхностных отложений, интенсификации диффузии выщелачивающего раствора в микротрещины, существенно ускоряют процесс – до 30 %, увеличивает процент извлечения целевых металлов – до 99,9 %.

Ключевые слова: ультразвуковое воздействие, активация, регенерация, переработка, бактериально-химическое выщелачивание, интенсивность излучения, кавитация

Благодарности, признательность, финансирование: Исследования выполнялись в рамках базового бюджетного финансирования НИГТЦ ДВО РАН Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (тема FWMR-2024-0003).

Для цитирования: Иодис В. А. Активация, регенерация и переработка отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):61-65. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-61-65>.

ACTIVATION, REGENERATION AND RECYCLING OF SPENT CATALYST USING ULTRASONIC IMPACT

V. A. Iodis✉

*Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation*

✉ iodisva@mail.ru

Abstract: The paper analyzes studies on the activation, regeneration and recycling of spent catalysts using ultrasound exposure. The study showed that ultrasonic treatment (22–44 kHz, up to 13 W/cm², up to 2 kW) of spent catalysts really allows for their activation and regeneration, by removing surface deposits, films, and dispersing catalyst particles. Comparison of methods using ultrasound with traditional methods of catalyst cleaning showed a significant reduction in process duration, an increase in the degree of cleaning, and the cost-effectiveness of recovery. The effects of using ultrasound - cavitation, radiation pressure, acoustic flows with frequencies of 20–22, 30, 35, 37, 80 kHz, intensities up to 10 W/cm² in the process of acid, bacterial-chemical leaching of spent catalysts, due to the destruction of oxide films and contaminants, removal of surface deposits, intensification of diffusion of the leaching solution into microcracks, significantly accelerates the process – up to 30 %, increases the percentage of extraction of target metals – up to 99.9 %.

Keywords: ultrasonic action, activation, regeneration, processing, bacterial-chemical leaching, radiation intensity, cavitation

Acknowledgments, funding, financial Support: The research is carried out within the framework of the basic budget financing of RGC FEB RAS the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FWMR-2024-0003).

For citation: Iodis VA. Activation, regeneration and recycling of spent catalyst using ultrasonic impact. *Mine Surveying and Sub-surface Use*. 2025;25(3):61-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-61-65>.

Введение

Одной из сложных проблем в охране окружающей среды является недостаточное вовлечение в оборот отходов производства, что приводит к потерям значительного количества вторичных ресурсов, которые при необходимости переработке могут вторично использоваться.

Катализаторы много лет используются в автомобильной, химической, нефтехимической и пищевой промышленности. В процессе использования катализаторы загрязняются, снижается площадь их рабочей поверхности, на частицах катализаторов образуются поверхностные отложения, и возникает необходимость в их замене и утилизации. Однако отработанные катализаторы являются источником значительного количества твердых и опасных отходов. В связи с увеличением затрат на их утилизацию, ростом стоимости материалов на их производство и экологическими проблемами возникает острая необходимость в разработке технологий активации, регенерации, переработки отработанных катализаторов.

В последние два десятилетия все большее внимание уделяется процессу регенерации, переработки отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия. Это связано с кавитационным и механическим воздействием ультразвука, способствующим снижению продолжительности процессов регенерации, переработки, уменьшению количества используемых реагентов, росту извлечения целевых металлов при переработке. Ультразвуковые эффекты приводят к разрушению оксидных пленок и загрязнений, удалению поверхностных отложений, эффекты ускоряют массоперенос, тем самым повышая эффективность процесса, его рентабельность [1–4].

Цель работы: анализ исследований по активации, регенерации и переработке отработанных катализаторов с использованием ультразвукового воздействия.

Методы работы

Обзор и анализ проведенных исследований по активации, регенерации и переработке отработанных катализаторов с использованием ультразвука, сравнение традиционных способов очистки катализаторов со способами, использующими ультразвуковую обработку.

Результаты

Активация и регенерация

Из-за нерентабельности активации, очистки и регенерации отработанных катализаторов традиционными методами их утилизируют. Однако использование ультразвуковой обработки ускоряет и удешевляет этот процесс. Это подтверждается исследованиями [5], где для повышения активности катализатора проведена его предварительная обработка ультразвуком частотой 22 000 Гц в течение 60 с, при температуре 25 °С и соотношении вода/катализатор – 1/1,5, которая повысила эффективность катализаторов марок НТК-10[ФХМ(М)] Ф и НКО 2-3 к84, содержащие оксиды Al, Ca, Cu, Ni, не изменяя их структурные характеристики.

Ультразвуковая обработка позволила повысить актив-

ность цеолитного катализатора ZSM-5 с введенным композитом $Rh/(C_{12}H_{22}O_8N_2)_n$ вследствие диспергирования частиц Rh и его более тонкодисперсного распределения по поверхности ZSM-5 [6]. Ультразвуковое воздействие позволило регенерировать палладиевый катализатор для гидрирования ацетиленового спирта [7].

Обработка катализатора проводилась в растворе C_3H_8O при частотах колебаний 15, 22 кГц, интенсивностях от 0,1 до 1 Вт/см² и продолжительностью от 3 до 5 минут. Авторы изобретения указывают, что при снижении интенсивности обработки не достигался эффект регенерации, а при возрастании интенсивности происходила диспергация катализатора и, как следствие, снижение его активности. Регенерация катализатора наступала вследствие очистки его поверхности, восстановления на поверхности соотношения палладий – цинк. При регенерации автомобильных катализаторов используется и ультразвуковое перемешивание с частотами 22 и 44 кГц, интенсифицирующее восстановление платиноидов Pt и Rh [8].

Воздействие ультразвукового излучения при удалении меркаптановой серы в процессе каталитического окисления меркаптанов в смеси $C_{10}H_{22}$, C_9H_{20} , $C_7H_5N_5O_8$ и $NaC_{12}H_{25}SO_4$ с катализатором Al_2O_3 позволило полностью ее удалить. Обработку осуществляли в реакционной камере, где при помощи магнитострикционного преобразователя возбуждали колебания 25 000 Гц интенсивностью 13 Вт/см², амплитудой 10 мкм, продолжительностью 300 с. Мощность генератора колебаний была 2 кВт [9]. Авторы объясняют эффект тем, что при частоте, близкой к резонансным частотам атомов серы, и энергии, превышающей энергию связей атомов в молекулах сернистых соединений, ультразвуковое воздействие очищает углеводородные фракции от серных примесей. Ультразвуковая чистка (регенерация) никелевого катализатора от масла в ультразвуковой ванне мощностью 80 Вт, частотой 40 000 Гц, при температуре процесса ультразвукового воздействия 80 °С, продолжительностью 180 минут позволила снизить длительность процесса в сравнении с традиционным методом – обработкой катализатора NaOH или Na_2CO_3 , увеличить удаление масла с 94,8 до 97,7 % [10, 11].

Описание процесса регенерации отработанного цеолитного катализатора FCC без разрушения микроструктуры и основы цеолита приведено в [12]. Процесс состоял из погружения катализатора в H_2SO_4 , выщелачивания в $C_2H_2O_4$ и H_2SO_4 при ультразвуковом воздействии 1 800 с, температуре процесса 70 °С и мощности колебаний 250 Вт. По окончании процесса регенерации был получен катализатор с полностью восстановленной микроструктурой. Эксперимент показал, что использование ультразвука позволяет в четыре раза ускорить процесс регенерации, однако увеличение мощности до 500 Вт приводит к разрушению структуры частиц катализатора.

Ультразвуковая обработка отработанных катализаторов позволяет проводить их активацию и регенерацию посредством удаления поверхностных отложений, пленок и диспергации частиц катализаторов.

Переработка

Выщелачивание Ni

Сокращение продолжительности процесса кислотного выщелачивания с 9 часов до 50 минут отработанного катализатора, содержащего 16 % оксида никеля, 78 % оксида алюминия, 5–6 % оксида кальция, 0,1 % кремния, удалось достичь авторам [13] при использовании ультразвукового воздействия. Отработанный катализатор измельчали и просеивали (размер частиц – 1–2 мм), далее к 5 г катализатора добавляли HNO_3 при концентрации 10–80 % по объему, перемешивали и смесь направляли в ультразвуковой реактор, где проводилась ультразвуковая обработка с частотой 30 000 Гц. Процесс проводился при температуре 30–90 °С. Кавитация, радиационное давление и акустические потоки позволяли очистить поверхность катализатора от нитрата никеля, проникать раствору в имеющиеся щели и трещины.

Ультразвуковая обработка позволила не только снизить время протекания процесса, но и увеличить извлечение целевого металла с 93 % при обычном кислотном выщелачивании до 95 %. Высокий процент извлечения никеля (≈ 99 %) был достигнут при переработке с использованием ультразвука отработанных катализаторов гидрообработки, содержащем 3,73 % по массе никеля, 1,26 % молибдена, 5,03 % ванадия, 23,64 % алюминия [14].

Разработанная технология переработки включала вакуумный пиролиз и выщелачивание серной кислотой в течение 20 минут, при температуре 45 °С с ультразвуковым воздействием мощностью 60 Вт, интенсивностью излучения 8 Вт/см². Радиационное давление и акустические потоки почти полностью удаляли масляные загрязнения с поверхностей измельченного катализатора. Существенное снижение времени протекания процесса, на 2 ч, наблюдалось при ультразвуковом выщелачивании HNO_3 (массовая концентрация – 65 %) отработанных катализаторов, содержащих 65 % никеля по массе с размером частиц 500 мкм [15]. Авторы объясняют рост кинетики процесса аналогично [13] – кавитацией и возникновением акустических потоков, способных увеличить диффузию выщелачивающего раствора в микротрещины. Ультразвуковая обработка проводилась при частоте 35 кГц, мощности 200–800 Вт, объемной интенсивности от 0,0225 до 0,0825 Вт/см³, температуре 70 °С. Извлечение никеля составило 70 %.

Выщелачивание V и Mo

Известен способ серноокислотной переработки катализаторов, содержащих ванадий [16], в котором отработанный катализатор измельчался (размер частиц – 20 мкм) и выщелачивался серной кислотой при Т:Ж = 1:5 в ультразвуковом поле (20 кГц, 630 Вт, 5 минут). Извлечение составило 98 % при снижении продолжительности и энергоемкости (в 2,5 раза) процесса, что, как отмечают авторы, связано с образованием мелкодисперсных частиц (0,05–0,250 мкм), диспергации под действием ультразвуковой обработки.

В ряде экспериментов исследования [17] кислотного выщелачивания H_2SO_4 катализаторов при температуре 60 °С, мощности ультразвука 360 Вт за 6 часов удалось достичь растворения наибольшей части ванадия – 95 %. Ультразвуковая обработка с выходной мощностью 200, 600 Вт отработанных катализаторов HDS (размер частиц – 2–8 мм) в процессе выщелачивания гидроксидом натрия

(20 г/л) – при температуре 80 °С, карбонатом натрия – при температуре 55 °С позволила извлечь 66 % молибдена за 10 минут обработки и 94,3 % этого металла за 2 часа обработки [18, 19]. Почти полностью (99,9 %) извлечь молибден из обожженного и измельченного отработанного катализатора марки АКМ1 получилось исследователям [20]. Процесс кислотного выщелачивания 2М раствором карбоната натрия включал две ступени продолжительностью от 15 до 30 минут при отношении твердого к жидкому 1:2,5, температуре 80 °С.

Как показал эксперимент, ультразвуковое воздействие после обжига катализатора с частотой 22 000 Гц, интенсивностью 10 Вт/см², мощностью 3 кВт может снизить общую продолжительность процесса на 20 минут, а при прочих равных условиях увеличить процент извлечения на 10 %.

Выщелачивание Al и La

Ультразвуковое воздействие с частотой 37 кГц и продолжительностью 40 минут в процессе выщелачивания (10,3 % по массе воды и 12,6 % FeSO_4) отработанных автомобильных катализаторов также показало рост извлечения алюминия на 12,2 % – с 69,5 до 81,7 % – в течение 4 часов при температуре 70 °С [21]. Почти полного извлечения лантана (97,1 %) удалось достичь авторам [22] при выщелачивании соляной кислотой катализатора высокотемпературной переработки нефти и ее фракций в ультразвуковой среде в течение 1 часа с мощностью 200 Вт при температуре 60 °С.

В сравнении с традиционным кислотным выщелачиванием благодаря кавитационным эффектам использование ультразвука увеличивает процент извлечения в 1,39 раза.

Бактериально-химическое выщелачивание

В бактериально-химических процессах оксидные пленки, поверхностные отложения на поверхности, например сульфидов, блокируют процессы их окисления. При этом процессы бактериального окисления активно происходят только на ограниченных участках открытой ювенильной поверхности частиц с некомпенсированными поверхностными дефектами кристаллических решеток, являющихся донорами электронов. Следовательно, разрушение пленок, отложений с минеральных частиц, агрегатов обеспечит активацию и повышение кинетики процесса бактериально-химического выщелачивания [1].

Анализ литературных источников показал, что данных экспериментов по бактериально-химическому выщелачиванию отработанных катализаторов с приведением параметров ультразвукового воздействия – малое количество. Биовыщелачивание измельченного отработанного катализатора HDS до размера частиц 75–100 мкм проводили при непрерывной и периодической обработке ультразвуком бактериальной суспензии с инокулятом грамотрицательных палочковидных бактерий *Escherichia coli* [23]. Обработка имела интенсивность излучения 0,15–2,2 Вт/см², частоты – 37 кГц и 80 кГц, мощности 130 и 100 Вт, продолжительность – 30 минут. Концентрация бактерий в начале эксперимента достигала $4\text{--}5 \times 10^9$ КОЕ/мл. Периодичность ультразвуковой обработки составляла двое суток.

Как показал эксперимент, использование периодического ультразвукового воздействия на бактерии позволило увеличить извлечение молибдена на 8 % – с 46 до 54 %. Кавитационное, механическое воздействие ультразвука в процессе переработки катализаторов в сравнении со стандартными

способами переработки существенно ускоряет процесс, увеличивает процент извлечения металлов.

Заключение

1. Ультразвуковая обработка (22–44 кГц, до 13 Вт/см²) отработанных катализаторов действительно позволяет проводить их активацию и регенерацию посредством удаления оксидных пленок, поверхностных отложений и измельчения частиц катализаторов.

2. Сравнение традиционных способов очистки катализаторов со способами, использующими ультразвук, показало существенное сокращение продолжительности процессов

при использовании УЗИ, рост степени очистки и рентабельность восстановления катализаторов.

3. Эффекты использования ультразвука – кавитация, радиационное давление, акустические потоки с частотами 20–80 кГц, интенсивностями до 10 Вт/см² в процессе кислотного, бактериально-химического выщелачивания отработанных катализаторов благодаря разрушению пленок и загрязнений, удалению поверхностных отложений, интенсификации диффузии выщелачивающего раствора в микротрещины до 30 % ускоряет процесс и увеличивает процент извлечения целевых металлов (до 99,9 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Трухин ЮП, Иодис ВА, Хайнасова ТС. СВЧ и УЗИ активация кинетики бактериально-химических процессов выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021;11(19):113–23. [Trukhin YP, Iodis VA, Khainasova TS. Microwave and ultrasound activation of kinetics of bacterial-chemical processes of leaching of cobalt-copper-nickel ores of the Shanuch deposit. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021;11(19):113–23 (In Russ.)]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_19_113
2. Iodis VA, Koydan IA. Investigation of oxide films removal process from the ore pulp particle surface during its ultrasonic treatment. *Non-Ferrous Metals*. 2024;1:8–12. DOI: 10.17580/nfm.2024.01.02
3. Иодис ВА. Использование ультразвукового воздействия для процесса бактериально-химического выщелачивания. *Недропользование XXI век*. 2024;3–4(104):114–8. [Iodis VA. Using ultrasonic influence for the process bacterial-chemical leaching. *Subsoil use XXI century*. 2024;3–4(104):114–8 (In Russ.)].
4. Блайда ИА, Васильева ТВ, Семенов КИ. Влияние ультразвука на процессы биовыщелачивания металлов и десульфуризации углей. *Микробиология и биотехнология*. 2017;4:6–20. [Blayda IA, Vasyleva TV, Semenov KI. Impact of ultrasound on coal desulfurization and process of bioleaching of metals. *Microbiology and biotechnology*. 2017;4:6–20 (In Russ.)]. DOI: 10.18524/2307-4663.2017.4(40).119111
5. Кузмина РИ, Кожихина АВ, Голосман ЕЗ и др. Ультразвуковое воздействие на цементсодержащие катализаторы очистки газов от оксидов азота и углерода (II). *Химия и химическая технология*. 2008;51(7):106–8. [Kuzmina RI, Kozhakhina AV, Golosman EZ, et al. Ultrasonic action on cement-containing catalysts for gas purification from nitrogen and carbon (II) oxides. *Chemistry and chemical technology*. 2008;51(7):106–8 (In Russ.)].
6. Батова ТИ, Обухова ТК, Колесниченко НВ и др. Влияние ультразвуковой обработки на физико-химические и каталитические свойства катализатора Rh*хитозан/НЦВМ в конверсии диметилового эфира в низшие олефины. *Нефтехимия*. 2019;59(5):569–74. [Batova TI, Obukhova TK, Kolesnichenko NV, et al. Effect of ultrasonic treatment on the physicochemical and catalytic properties of Rh*chitosan/NCVM catalyst in the conversion of dimethyl ether to lower olefins. *Neftekhimiya*. 2019;59(5):569–74. (In Russ.)]. DOI: 10.1134/S0028242119050034.
7. Патент RU № 2080921, 10.06.1997. Способ регенерации палладиевого катализатора гидрирования / Сульман ЭМ, Сульман МГ, Матвеева ВГ [и др.]. [Patent RU № 2080921, 10.06.1997. Process for regeneration of hydrogenation of palladium catalyst / Sul'man EhM, Sul'man MG, Matveeva VG et al. (In Russ.)].
8. Патент RU № 2464088, 20.10.2012. Способ регенерации автомобильных катализаторов. Бюллетень 29 / Миргород ЮА, Емельянов СГ, Борщ НА [Patent RU № 2464088, 20.10.2012. Method of automotive catalyst. Bull. 29 / Mirgorod JuA, Emel'janov SG, Borshch NA (In Russ.)].
9. Муллакаев МС, Асылбаев ДФ, Оганян ГБ и др. Ультразвуковая интенсификация процесса каталитического окисления меркаптанов. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 2010;9:39–41. [Mullakaev MS, Asylbaev DF, Oganyan GB, et al. Ultrasonic intensification of the process of catalytic oxidation of mercaptans. *Oil refining and petrochemicals*. 2010;9:39–41 (In Russ.)].
10. Аллоберганова АМ, Юнусов ОК, Ачилова СС и др. Интенсификация процесса обезжиривания отработанного никелевого катализатора гидрогенизации жиров. *Химическая технология*. 2023;12(117):48–52. [Alloberganova AM, Yunusov OK, Achilova SS, et al. Hydrogenation of vegetable oils using effectively regenerated catalyst. *Chemical technology*. 2023;12(117):48–52 (In Russ.)]. DOI: 10.32743/UniTech.2023.117.12.16552.
11. Аллоберганова АМ, Юнусов ОК, Ачилова СС и др. Гидрирование растительных масел с эффективным использованием регенерированного катализатора. *Химическая технология*. 2023;12(117):53–6. [Alloberganova AM, Yunusov OK, Achilova SS, et al. Intensification of the fat recovering process of spent nickel fat hydrogenation catalyst. *Chemical technology*. 2023;12(117):53–6 (In Russ.)]. DOI: 10.32743/UniTech.2023.117.12.16507.
12. Wang T, Le T, Ravindra AV, et al. Enhanced regeneration of spent FCC catalyst by using oxalic acid-sulfuric acid mixture under ultrasonic irradiation. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;15:7085–99. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.126.
13. Oza R, Shah N, Patel S. Recovery of nickel from spent catalysts using ultrasonication-assisted leaching. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2011;86(10):1276–81. DOI: 10.1002/jctb.2649.
14. Feng CL, Zhang C, Yuan SH, et al. Sustainable recovery of surface-deposited oils and valuable metals from uncrushed spent hydroprocessing catalysts. *Journal of Cleaner Production*. 2022;338:130564. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130564.
15. Lim MSW, Yang TCK, Yap YH, et al. Intensification and optimisation of nickel recovery from spent hydrogenation catalysts via ultrasound-augmented hydrometallurgy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9:105771. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105771.
16. Патент BY № 17007, 30.04.2013. Способ переработки отработанных ванадиевых катализаторов сернокислотного производства / Орехова СЕ, Крышилович ЕВ, Курило ИИ. [Patent BY № 17007, 30.04.2013. Method for processing spent vanadium catalysts from sulfuric acid production / Orekhova SE, Kryshilovich EV, Kurilo II. (In Russ.)].
17. Marafi M, Stanislaus A. Waste catalyst utilization: Extraction of valuable metals from spent hydroprocessing catalysts by ultrasonic-assisted leaching with acids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011;50(16):9495–501. DOI: 10.1021/ie200789u.
18. Pinto ISS, Soares HMVM. Selective leaching of molybdenum from spent hydrosulphurisation catalysts using ultrasound and microwave methods. *Hydrometallurgy*. 2012;129:19–25. DOI: 10.1016/j.hydromet.2012.08.008.

19. Wang L, Chao L, Qu WW, et al. Ultrasound-assisted Oil removal of gamma-Al₂O₃-based spent hydrosulfurization catalyst and Microwave roasting recovery of metal Mo. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;49:24-32. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.023.
20. Краснобабцев МА, Гавриченко НВ, Бояринцев АВ и др. Карбонатное выщелачивание молибдена из отработанного катализатора гидроочистки. *Успехи в химии и химической технологии*. 2018;XXXII(9):51-3. [Krasnobabcev MA, Gavrichenko NV, Boyarintsev AV, et al. Carbonate leaching of molybdenum from spent hydrotreatment catalyst. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2018;XXXII(9):51-3 (In Russ.)]
21. Hosseinzadeh F, Rastegar SO, Ashengroph M, et al. Ultrasound-assisted Fenton-like reagent to leach precious metals from spent automotive catalysts: process optimization and kinetic modeling. *The International Journal of Environmental Science and Technology*. 2021;18(11):3449-58. DOI: 10.1007/s13762-021-03324-z.
22. Sadeghi SM, Jesus J, Pinto E, et al. A simple, efficient and selective process for recycling La (and Al) from fluid cracking catalysts using an environmentally friendly strategy. *Minerals Engineering*. 2020;156:106375. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106375.
23. Vyas S, Ting Y. Effect of ultrasound on bioleaching of hydrosulphurization spent catalyst. *Environmental Technology & Innovation*. 2019;14:100310. DOI: 10.1016/j.eti.2019.01.004.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Валентин Алексеевич Иодис –

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук
(НИИГТЦ ДВО РАН), 683002, г. Петропавловск-Камчатский,
Российская Федерация, e-mail: iodisva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>

ABOUT THE AUTHOR

Valentin A. Iodis –

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research
Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian
Academy of Sciences, 683002, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Russian Federation, e-mail: iodisva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8002-0658>

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.04.2025.

Поступила после рецензирования: 05.06.2025.

Принята к публикации: 17.06.2025.

Article info

Received: 30.04.2025.

Revised: 05.06.2025.

Accepted: 17.06.2025.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЕОСТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А. А. Басаргин✉

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н. В. Мельникова» Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ abaspirant@mail.ru

Аннотация: Приведены результаты оценки минеральных ресурсов с помощью геостатистических методов интерполяции в условиях влияния локальной и пространственной неопределенности для золоторудного месторождения «Агинское». Для получения вариограмм на основе расстояния / градиента и расстояния / относительной глубины для обработки данных геологического опробования на месторождении были использованы исследования альтернативных геостатистических методов. Были рассмотрены процессы использования двух геостатистических методов: индикаторного кригинга и последовательного индикаторного моделирования. На основе данных методов для каждой зоны были рассчитаны композиты, статистика и вариограммы на основе проб золота из разведочных скважин и эксплуатационных взрывных скважин. На основе индикаторного кригинга разведочных скважин была создана модель блока извлекаемых запасов, а на основе эксплуатационных взрывных скважин – модель блока контроля содержания. Модель извлекаемых запасов была откалибрована на основе модели контроля содержания и данных по выработанной части рудного тела. Результаты исследований могут быть полезными горнодобывающим компаниям для оптимизации работы карьера и количественной оценки минеральных ресурсов.

Ключевые слова: Агинское месторождение, разведочные скважины, эксплуатационные взрывные скважины, геостатистика, пространственная неопределенность, геостатистические методы

Благодарности, признательность, финансирование: работа выполнена при поддержке темы «Разработка фундаментальных основ моделирования, автоматизации и роботизации процессов горного производства для обеспечения оптимального управления и устойчивого функционирования горнотехнических систем» при ИПКОН РАН.

Для цитирования: Басаргин А.А. Применение методов геостатистического анализа для оценки ресурсного потенциала золоторудного месторождения. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):66-72. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-66-72>.

APPLICATION OF GEOSTATISTICAL ANALYSIS METHODS FOR ASSESSMENT OF THE RESOURCE POTENTIAL OF A GOLD ORE DEPOSIT

A. A. Basargin✉

Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Problems of Comprehensive Development of Subsoil Academician N. V. Melnikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ abaspirant@mail.ru

Abstract: The article presents the results of assessing mineral resources using geostatistical interpolation methods under the influence of local and spatial uncertainty for the Aginskoye gold deposit. This paper presents a case study to support the use of alternative geostatistical methods that use distance/gradient and distance/relative depth variograms to process field geological sampling data. The processes of using two geostatistical methods are described in detail: indicator kriging and sequential indicator modeling. Based on these methods, composites, statistics and variograms were calculated for each zone based on gold samples from exploration wells (PS) and production blast holes (PBH). The model of the recoverable reserves block based on indicator kriging was created on the basis of exploration wells, and the model of the content control block was created on the basis of production blast holes. The

recoverable reserves model was calibrated based on the grade control model and data from the mined-out portion of the ore body. The research results can be useful to mining companies for optimizing quarry operations and for quantifying mineral resources.

Keywords: geostatistics, spatial uncertainty, geostatistical methods, Aginskoye field, production blast wells, exploration wells

Acknowledgments, funding, financial Support: The work was carried out with the support of the theme «Development of fundamental principles of modeling, automation and robotization of mining production processes to ensure optimal control and sustainable operation of mining engineering systems» at the IPKON RAN.

For citation: Basargin AA. Application of geostatistical analysis methods for assessment of the resource potential of a gold ore deposit. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):66-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-66-72>.

Введение

Геологическое моделирование золоторудного месторождения предполагает разделение минерализованной совокупности на однородные группы. Это делается путем группировки минерализации в соответствии с геологическими особенностями, такими как изменения, расслоение, структурная единица и однородность содержания.

У Агинского месторождения природа вулканического порфиrowого типа и его простая геометрическая конфигурация делают его менее сложным с точки зрения моделирования. Однако рассеянный характер месторождения означает, что придется потратить больше времени на моделирование «высококонцентрированного» ядра месторождения, чтобы ограничить его влияние на область с более низким содержанием [1].

Составление интервала анализа, также известное как регуляризация, включает группирование анализа разных интервалов в стандартную длину. Композиты представляют собой 3D-точки, центр тяжести которых находится в середине составного интервала. Преимущество композитинга заключается в стандартизации веса, приписываемого каждому интервалу, и в корректировке изменчивости композитов в соответствии с масштабом, в котором будет разрабатываться месторождение. Преимуществом этого метода также является снижение общей изменчивости, что в свою очередь помогает при моделировании экспериментальных вариограмм. В случае Агинского месторождения композиты рассчитываются внутри каждой геологической оболочки.

Анализ непрерывности, который можно определить как методологию исследования пространственной непрерывности переменных, распределенных в пространстве, является основой геостатистического исследования. Время, потраченное на этом этапе на исследование, понимание и описание данных, приведет к использованию более точных предположений в вариографическом анализе и окажет серьезное влияние на ошибку, связанную с оценкой [2–5].

После установления пространственной непрерывности минерализации с помощью вариографии следующим шагом будет оценка содержания месторождения в неотобранных участках. Этого можно достичь, используя методы интерполяции, такие как обратное расстояние, простой кригинг, обычный кригинг, индикаторный кригинг, логарифмический кригинг, кокригинг, вероятностный кригинг и т.д.

Долгое время оценку запасов ресурсов было не с чем сравнивать. После того как была создана модель блоков ресурсов, оценки можно было сравнить с реальностью только во время кампании по массовому отбору проб на ранней стадии разведки или во время эксплуатации рудника. Методика анализа изменчивости и чувствительности оценок содержания месторождения отсутствовала, что в большинстве случаев приводило к завышению оценки содержания.

Цель исследований: оценка минеральных запасов золоторудного месторождения Агинское с помощью метода нелинейной интерполяции и оценка неопределенности минерализации посредством условного моделирования.

Объект исследований

Месторождение «Агинское» находится в пределах архейского зеленокаменного пояса. Это единственное месторождение вкрапленного Au-Cu вулканопорфиrowого типа, расположенное в поясе.

Месторождение состоит из двух пластов. Эти зоны расположены в промежуточной порфиrowой вулканической толще, внутри которой встречаются вытянутые зоны гидротермальной брекчии.

Минерализация может быть охарактеризована как вкрапленная в ядре и прожилке или смещенная к краям. Судя по всему, существовало как минимум две фазы минерализации. Первая была богата медью, а вторая – золотом. Минерализация имеет азимут 35° и падение от 60° до 70° на северо-запад. Примерно 25 % золота находится в свободном состоянии и извлекается гравиметрическим методом (рис. 1).

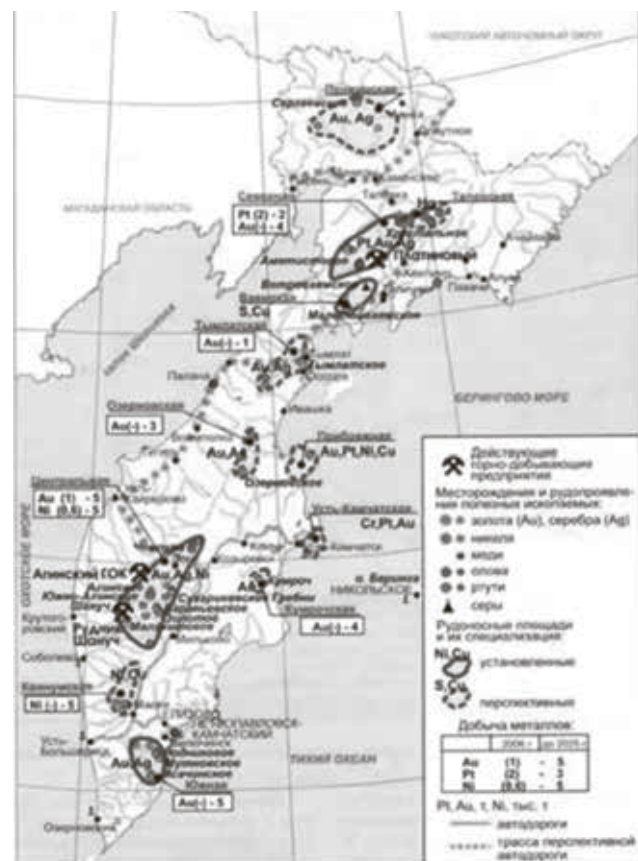


Рис. 1. Агинское месторождение золота / Fig. 1. Aginskoye gold deposit

Агинское золотое месторождение расположено в центральной части Камчатской области, на территории Быстринского административного района, в 90 км к юго-западу от пос. Эссо и в 95 км к северо-западу от с. Мильково, с которым имеется связь грунтовой дорогой протяженностью 127 км.

Месторождение открыто в 1964 году. Поисковые и разведочные работы проводились с 1973 до 1985 года.

По разведанным запасам Агинское золоторудное месторождение относится к средним по России – 35 тонн золота. При довольно небольших параметрах рудные тела Агинского месторождения отличаются высокой концентрацией золота, в среднем составляющим 43 г/т. В наиболее богатых рудных столбах содержание золота достигает от 1 до 5 кг/т.

Материал и методы исследования

В горнодобывающей промышленности условное моделирование используется для оценки [5–7]:

- изменчивости пространственного распределения минерализации;
- анализа рисков / чувствительности в процессе планирования горных работ;
- дополнительного бурения в зависимости от неопределенности содержания;
- влияния размера блока на изменчивость руды.

Для оценки золоторудного месторождения «Агинское» было использовано 314 эксплуатационных взрывных скважин (ЭВС) из базы данных, которые содержат в общей сложности 30 060 проб золота.

Эти пробы были объединены в трехметровые интервалы скважины, начиная с муфты. Составное расстояние было выбрано с учетом общего падения рудного тела. При составном интервале 3 м и падении рудного тела 60° это дает расстояние по вертикали примерно 2,5 м между каждым образцом.

В таблице 1 приведены статистические данные для одно-метровых анализов для каждой зоны.

Для базы данных анализа РС композиты не были рассчитаны. Поскольку большая часть базы данных содержит пробы, взятые через каждые 5 м, и лишь недавно были введены интервалы отбора проб в 10 м (табл. 2).

Для Агинского месторождения методом оценки пространственной непрерывности были выбраны традиционные вариограммы на основе индикаторно-преобразованных составных данных. Выбор был продиктован использованным методом интерполяции, в данном случае индикаторным кригингом. Преимущество индикаторного преобразования заключается в разбиении кумулятивной функции распределения на интервалы. Объединение этих интервалов даст лучшее определение расчетной кумулятивной функции распределения. Преобразование индикатора также имеет то преимущество, что исключает дополнительный этап поиска выбросов (данных с аномально высокими значениями) и соответствующей обработки их. Вместо этого все выбросы сохраняются такими, какие они есть. Это связано с тем, что вариограммы индикатора рассчитываются на основе дискретизации значения оценки на 0 и 1 [8–10].

При рассмотрении выбора метода интерполяции необходимо учитывать некоторые основные критерии, чтобы определить, подходит ли этот метод или нет.

Критерии включают в себя:

- тип месторождения (порфировое, колчеданное, эпиптермальное);
- изменчивость минерализации (эффект самородка, выбросы);
- непрерывность минерализации (метры, километры);
- тип контакта (жесткий, мягкий);
- количество выборок для интерполяции (достаточно данных в каждой зоне);
- продвижение проекта (ранняя стадия разведки, уплотняющее бурение);
- объем проекта (обзор, технико-экономическое обоснование);
- сроки проведения исследования (неделя, месяц).

Преимущество индикаторного кригинга заключается в создании различных моделей непрерывности для разных направлений на разных пороговых значениях, что улучшает определение вариограммы, которая будет использовать

Таблица 1 / Table 1

Статистика анализа эксплуатационных взрывных скважин / PBH analysis statistics

Зона	Количество образцов	Максимум	Минимум	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Вариация	Кoeffициент вариации	Количество образцов >0,5	Среднее >0,5
ALL	30,060	108,15	0,00	0,62	0,19	2,15	4,63	3,50	8,314	1,85
HW	9,182	42,99	0,00	0,27	0,27	0,84	0,71	3,14	1,160	1,30
CORE	7,767	103,01	0,00	1,22	0,62	2,76	7,63	2,26	4,413	1,98
FW	8,923	108,15	0,00	0,41	0,12	2,02	4,08	4,88	1,509	1,83
87S	4,188	100,08	0,00	0,69	0,23	2,80	7,84	4,07	1,232	1,93

Таблица 2 / Table 2

Статистика анализа РС / PB analysis statistics

Зона	Количество образцов	Максимум	Минимум	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Вариация	Кoeffициент вариации	Количество образцов >0,5	Среднее >0,5
ALL	189,415	73,54	0,00	0,65	0,34	1,02	1,04	1,57	73,991	1,36
HW	69,163	73,54	0,00	0,34	0,19	0,61	0,37	1,79	13,039	1,07
CORE	65,828	63,02	0,00	1,13	0,80	1,29	1,66	1,15	45,392	1,51
FW	48,925	69,03	0,00	0,46	0,24	0,84	0,71	1,83	13,605	1,19
87S	5,499	22,93	0,00	0,53	0,34	0,70	0,50	1,33	1,955	1,08

ся в интерполяции. Преимуществом этого метода также является оценка локальной неопределенности оценок, которую можно использовать для анализа рисков и принятия решений.

При использовании таких методов, как обычный и простой кригинг, неопределенность возникает из-за дисперсии ошибок. Использование дисперсии ошибки кригинга может ввести в заблуждение, поскольку дисперсия зависит не от значения данных, а от местоположения данных и используемой вариограммы [11].

Результаты исследований

Одним из хороших подходов для описания и понимания пространственной корреляции является использование графических инструментов, таких как графики и карты. В данном случае использовалось сочетание карт местоположения и контурных карт уклонов. Сначала были созданы карты для разных уступов и разных геологических зон. Однако из-за небольшого количества данных, доступных для каждого стенда, для создания согласованных карт было решено сгруппировать данные целиком. На основе этих контурных карт можно получить предварительную информацию, связанную с ориентацией рудного тела (рис. 2).

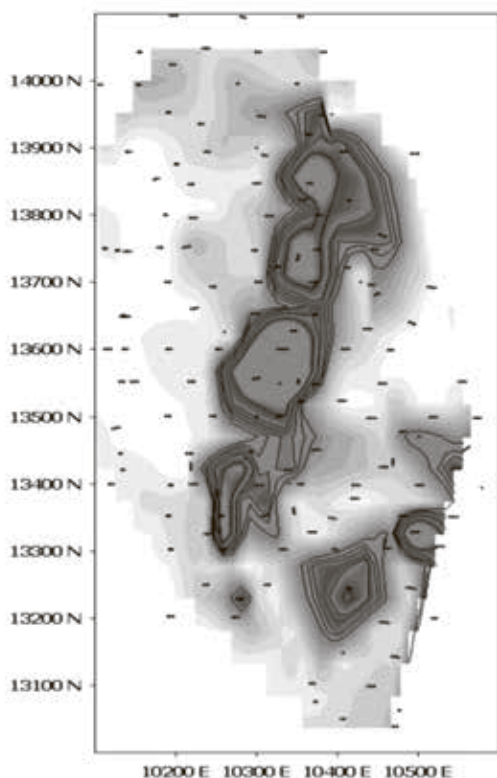


Рис. 2. Контурная карта оценок /
Fig. 2. Contour score map

В целом распределение содержаний, по-видимому, имеет преимущественную ориентацию примерно от 10° до 30° северо-северо-востока. Никакого явного падения от одного тела к другому не видно. Однако смещение рудного тела с востока на запад можно проследить от верхних уступов к нижним, что указывает на падение минерализации в западном направлении [12].

Анализ пространственной непрерывности осуществляет-

ся с помощью вариограммы. Вариограммы рассчитываются на разных интервалах расстояний (лаговом расстоянии), для разных ориентаций (азимута, падения) и для разных размеров конического поиска (угла допуска). Для Агинского месторождения методом оценки пространственной непрерывности месторождения были выбраны вариограммы на основе индикаторно-преобразованных составных данных анализов для ЭВС и данных анализов для РС. Выбор был продиктован использованным методом интерполяции, в данном случае индикаторным кригингом. Преимущество индикаторного преобразования заключается в разбиении кумулятивной функции распределения (КФР) на интервалы. Это устраняет неблагоприятное влияние анализа более высокого класса на оценку.

Из графиков кумулятивной функции распределения, представленных ниже (рис. 3 и 4), мы можем наблюдать подъем кривой по мере увеличения содержания для обоих наборов данных. Это указывает на увеличение изменчивости образцов по мере увеличения содержания, что типично для месторождения вкрапленного золота. С другой стороны, графики КФР не показывают какой-либо точки перегиба, что означает, что в обоих наборах данных присутствует только одна совокупность.

Вариограммы были разработаны для каждого набора данных и каждого порогового значения. Сначала была рассчитана всенаправленная вариограмма, чтобы установить эффект самородка во всех направлениях. Эффект самородка можно определить как отсутствие непрерывности на небольших расстояниях от скважины, которое нельзя связать с какими-либо геологическими изменениями.

Были рассчитаны и смоделированы вариограммы для основных направлений, таких как забойное и по простиранию. Были проанализированы результаты вариограмм трех основных направлений, при этом компоненты порога трех направлений были разными. Это может быть связано с типом анизотропии, называемым «зональной анизотропией» [13].

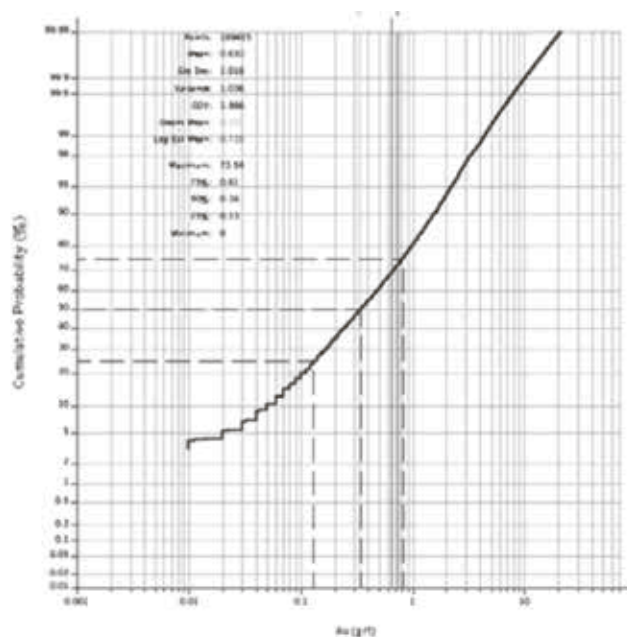


Рис. 3. Кумулятивная функция распределения анализа эксплуатационных взрывных скважин для всех зон /
Fig. 3. Cumulative distribution function of EMU analysis for all zones

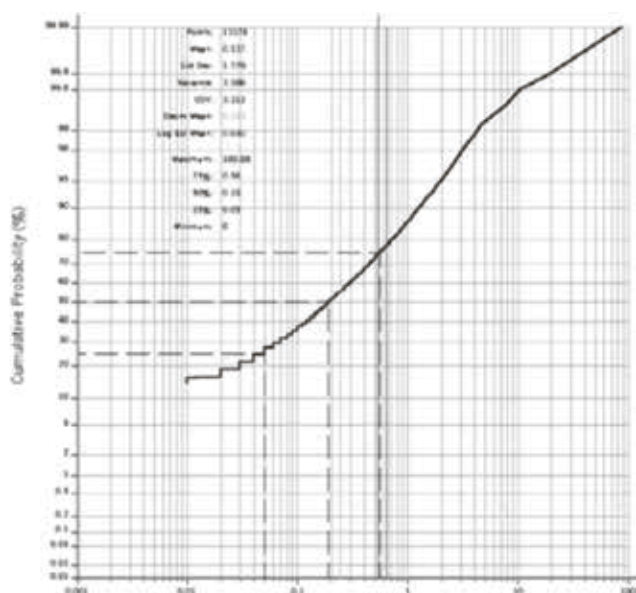


Рис. 4. Кумулятивная функция распределения анализа РС для всех зон /
Fig. 4. Cumulative distribution function of PC analysis for all zones

На рисунке 5 и 6 представлены вариограммы зоны для данных ЭВ) и РС. Как видно, оба набора данных демонстрируют четко выраженные полувариограммы при пороговом значении 0,5 г/т. При работе с данными разведки количество пар, используемых в каждом лаге, кажется достаточным для создания вариограмм, подходящих для моделирования. Это расстояние задержки было выбрано для определения существенных аномалий, в форме вариограмм для обоих наборов данных нет.

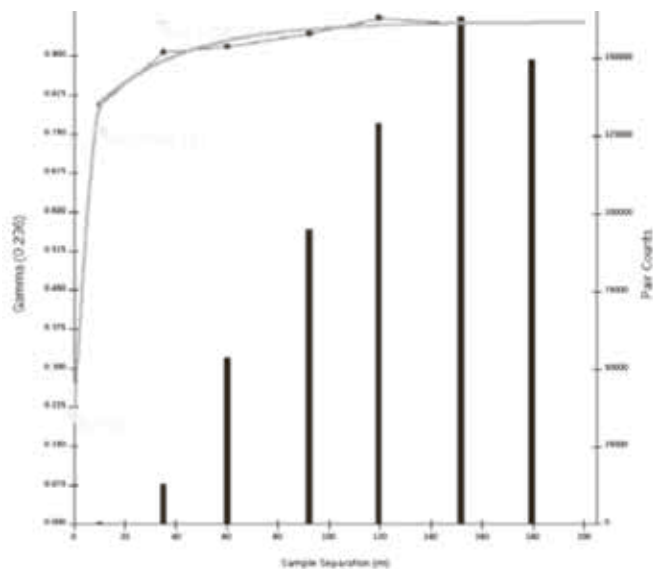


Рис. 5. Вариограмма простирания для эксплуатационных взрывных скважин при 0,5 г/т зоны CORE /
Fig. 5. Variogram of strike for EMU at 0.5 g/t CORE zones

Вариограммы были созданы на основе трансформированных индикатором составных анализов набора данных ЭВС и анализов набора данных РС. Пороговые значения индикаторов были установлены при различных бортовых содержаниях золота, чтобы отразить различные закономерности непрерывности, а также создать практические вариограммы, чего не было при использовании нетрансформированных данных.

Индикаторные вариограммы были построены в основных направлениях, то есть по простиранию, поперек простирания и в скважине. Для определения изменчивости в коротком масштабе использовалась всенаправленная вариограмма (эффект самородка). В случае набора данных ЭВС индикаторные вариограммы были смоделированы с использованием сферической модели для первой структуры и сферической или экспоненциальной модели для второй структуры. Для набора данных РС индикаторные вариограммы были смоделированы с использованием либо сферической, либо экспоненциальной модели для обеих структур.

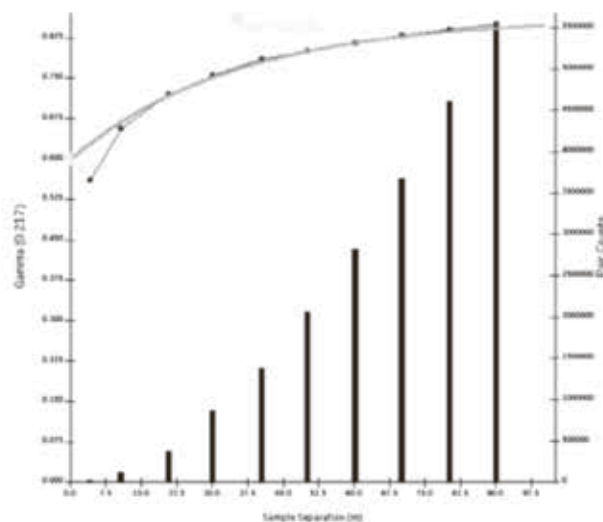


Рис. 6. Вариограмма простирания для РС при 0,5 г/т зоны CORE /
Fig. 6. Variogram of strike for PC at 0.5 g/t CORE zones

По сравнению с реальностью обычные оценки кригинга будут переоценивать исходные данные с низким содержанием и недооценивать с высоким содержанием. Этот эффект сглаживания будет более выраженным, если оцениваемый блок находится далеко, чем если блок находился близко к местоположению. Этот недостаток обусловлен одним из принципов кригинга, который заключается в минимизации дисперсии ошибок. Вариационный компонент моделирования вводится алгоритмом Монте-Карло, который моделирует случайные равномерно распределенные числа от 0 до 1.

После выбора алгоритма моделирования необходимо выбрать количество раз, которое будет моделироваться месторождение. На это нет четкого ответа и нельзя использовать эмпирические правила для выбора подходящего количества симуляций для данного месторождения. Текущее ограничение больше связано со значительным количеством времени, необходимым для последующей обработки моделирования, чем с фактическим временем моделирования месторождения. Из-за внутренней изменчивости месторождения «Агинское» считалось, что 25 симуляций будет достаточно для создания широкого спектра возможных сценариев [14–15]. Цифровая модель месторождения «Агинское» представлена на рисунке 7.

Следующим шагом в процессе реализации является создание сетки, которая будет охватывать интересующую область. В случае Агинского месторождения были определены четыре различные сетки для покрытия каждой из зон. Сетка определяется серией узлов. Расстояние между узлами важно, поскольку оно отражает размер поддержки переменных.



Рис. 7. Модель золоторудного месторождения «Агинское» (метод индикаторный кригинг) /

Fig. 7. Model of the Aginskoye gold deposit (indicator kriging method)

Заключение

1. Таким образом, в результате исследования геостатистических методов интерполяции для золоторудного месторождения «Агинское» было доказано, что метод кригинга может улучшить результаты оценки минеральных ресурсов по сравнению с негеостатистическими методами интерполяции. Это достигается за счет учитывания распределения содержаний в процессе интерполяции и оценке локальной неопределенности.

2. В результате вариограммного анализа получено, что для ЭВС эффект самородка в основной зоне (CORE) составляет около 40 % от значения порога и около 70 % в трех других зонах (FW, HW, 87S). С другой стороны, изменчивость данных РС не показывает существенной разницы в эффекте самородка между зонами и обычно составляет около 70 % от значения порога.

3. Данные методы, примененные на месторождении «Агинское» для оценки ресурсов и анализа риска, могут быть распространены на другие области. Одним из способов могло бы стать использование вероятностей из индикаторной модели кригед для управления стратегией отбора проб в области богатого материала, где вероятность появления невелика. По такому же принципу инженер-планировщик мог бы использовать вероятность из модели, чтобы соотнести производство с уровнями неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Басаргин АА. Создание цифровых моделей месторождений полезных ископаемых с применением современных технологий. *Вестник СГГА*. 2014;1(25):34-40. [Basargin AA. Creation of digital models of mineral deposits using modern technologies. *Bulletin of the SSGA*. 2014;1(25):34-40 (In Russ.)]
2. Басаргин АА. Методика создания трехмерных геологических моделей месторождений с использованием геоинформационной системы Micromine. «ГЕО-Сибирь – 2015»: сб. мат-лов Межд. науч. конгр. Новосибирск, 2015;1:15-20. [Basargin AA. Methodology for creating three-dimensional geological models of deposits using the Micromine geographic information system. *Collection of materials of the international scientific congr. «GEO-Siberia – 2015»*. Novosibirsk; 2015;1:15-20 (In Russ.)]
3. Урумов ВА, Босиков ИИ. 3D-модель и закономерности распределения полезных компонентов залежи Анненская жезказганского месторождения. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2015;7(1):11-6. [Urumov VA, Bosikov II. 3D model and patterns of distribution of useful components of the Annenskaya deposit of the Zhezkazgan deposit. *Sustainable development of mountain territories*. 2015;7(1):11-6 (In Russ.)]
4. Шульга ЕС. Чем порадует 2018 год пользователей программы Micromine. *Золото и технологии*. 2017;4(38):50-3. [Shulga ES. What will 2018 please users of the Micromine program. *Gold and Technologies*. 2017;4(38):50-3 (In Russ.)]
5. Осипов ВЛ. Определение рудных интервалов при подсчете запасов в программе Micromine. *Горные науки и технологии*. 2018;2:23-31. [Osipov VL. Determination of ore intervals when calculating reserves in the Micromine program. *Mining Sciences and Technologies*. 2018;2:23-31 (In Russ.)]
6. Шевкун ЕБ, Лещинский АВ, Галимьянов АА. Короткая комбинированная забойка взрывных скважин высокой запирающей способности. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015;4:331-6. [Shevkun EB, Leshchinsky AV, Galimyanov AA. Short combined driving of blast holes with high locking capacity. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;4:331-6 (In Russ.)]
7. Чантурия ВА, Макаров ВН, Макаров ДВ. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья. Апатиты, 2005:218. [Chanturia VA, Makarov VN, Makarov DV. Ecological and technological problems of processing technogenic sulfide-containing raw materials. Apatity, 2005:218 (In Russ.)]
8. Нурмухаметова АТ. 3-х мерное моделирование при подсчете объемов полезного ископаемого. *Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина*. Томск, 2017:582-3. [Nurmukhametova AT. 3-dimensional modeling when calculating the volume of mineral resources. *Problems of geology and subsoil development: proceedings of the XXI International Symposium named after Academician M. A. Usov of students and young scientists, dedicated to the 130th anniversary of his birth Professor M.I. Kuchin*. Tomsk, 2017:582-3 (In Russ.)]
9. Бесимбаева ОГ, Хмырова ЕН, Бедарев АС и др. Исследование возможности 3D моделирования для маркшейдерского обеспечения ведения горных работ. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь – 2014*. X Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»: сб. материалов: в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). Новосибирск, 2014;(2):178-83. [Besimbaeva OG, Khmyrova EN, Bedarev AS, et al. Study of the possibility of 3D modeling for surveying support of mining operations. *Interexpo GEO-Siberia-2014*. X International scientific congr.: Int. scientific conf. "Geodesy, geoinformatics, cartography, surveying": collection. materials in 2 volumes (Novosibirsk, April 8-18, 2014). Novosibirsk, 2014;(2):178-83 (In Russ.)]
10. Воскова АВ, Гуня АН, Караваев ВА, и др. Землепользование и возможности регулирования антропогенной нагрузки на горные ландшафты северного макросклона Большого Кавказа (На примере долины р. Карасу). *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(1):16-24. [Voskova AV, Gunya AN, Karavaev VA, et al. Land use and possibilities for regulating anthropogenic load on mountain landscapes of the northern

macroslope of the Greater Caucasus (On the example of the Karasu River valley). *Sustainable Development mountain areas*. 2021;13(1):16-24 (In Russ.)). DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-16-24.

11. Дроздов АЮ. Решение задач сетевого анализа с применением PostgreSQL/PostGIS / «Строительство и архитектура – 2015». *Современные информационно-экономические технологии: тенденции и перспективы развития: мат-лы Межд. науч.-практ. конф.* Ростов-на-Дону, 2015:71-2. [Drozdov AYU. Solving network analysis problems using PostgreSQL/PostGIS / “Construction and Architecture – 2015”. *Modern information and economic technologies: trends and development prospects. Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don, 2015:71-2 (In Russ.)]

12. Ермолаев НР. Использование программного обеспечения QGIS при подготовке картографических материалов. *Ломоносов-2018: тезисы докладов XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых.* Москва, 2018:250-51. [Ermolaev NR. Using QGIS software in the preparation of cartographic materials. *Lomonosov-2018: abstracts of the XXV International Scientific Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists*. 2018:250-51. (In Russ.)]

13. Пашковская ОВ, Новоселов ОВ, Потапенко ИА. Анализ данных в геоинформационной системе QGIS. *Решетневские чтения: материалы XXIV Межд. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева* (10–13 нояб. 2020, г. Красноярск): в 2 ч. Красноярск, 2020;2:345-6. [Pashkovskaya OV, Novoselov OV, Potapenko IA. Data analysis in the QGIS geographic information system. *Reshetnev Readings: materials of the XXIV International. scientific-practical conf., dedicated in memory of the general designer of rocket and space systems, Academician M. F. Reshetnev* (November 10–13, 2020, Krasnoyarsk): at 2 o'clock. Krasnoyarsk, 2020;2:345-6 (In Russ.)]

14. Kongar-Syuryun CB, Aleksakhin AV, Eliseeva EN, et al. Modern Technologies Providing a Full Cycle of Geo-Resources Development. *Resources*. 2023;12:50. DOI: 10.3390/resources12040050.

15. Lapinskas AA. Influence of mining rent on the efficiency of using natural potential: the paradox of plenty and its Russian specifics. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:79-94. DOI: 10.31897/PMI.2023.13.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Андрей Александрович Басаргин – старший научный сотрудник № 3.1 лаборатории геологоструктурного моделирования ИПКОН РАН, 111020, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: abaspirant@mail.ru

ABOUT THE AUTHOR

Andrey A. Basargin – Senior Researcher No. 3.1 Laboratory of Geological-Structural Modeling, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russian Federation, e-mail: abaspirant@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 31.03.2025.

Поступила после рецензирования: 24.05.2025.

Принята к публикации: 11.06.2025.

Article info

Received: 31.03.2025.

Revised: 24.05.2025.

Accepted: 11.06.2025.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА КАК ГАЗОМОТОРНОГО ТОПЛИВА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Г. М. Дубов[✉], М. Ю. Яцевич, Д. А. Бороненков, Д. М. Якобсон

ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»,

г. Кемерово, Российская Федерация

✉ dubovgm@kuzstu.ru

Аннотация: Проведен анализ мирового опыта и преимуществ применения сжиженного природного газа (СПГ) как моторного топлива для технологического транспорта. Дается сравнительный анализ СПГ по отношению к нефтяным видам моторных топлив. Рассматриваются ключевые аспекты применения СПГ, включая его экологическую, техногенную и экономическую выгоду по сравнению с традиционными видами моторных топлив. Представлен мировой опыт использования СПГ в разных странах, где этот вид топлива получил значительное распространение. Рассмотрены ключевые особенности и пример транспортно-заправочной инфраструктуры СПГ на участках горных выработок. Особое внимание уделено российскому опыту и проблемам, связанным с развитием инфраструктуры для применения СПГ как газомоторного топлива. Приводятся примеры успешно реализованных в России проектов по использованию СПГ как газомоторного топлива на технологическом транспорте, в частности на карьерной технике.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, газомоторное топливо, технологический транспорт, экологические и техногенные преимущества, экономическая эффективность

Для цитирования: Дубов ГМ, Яцевич МЮ, Бороненков ДА и др. Опыт использования сжиженного природного газа как газомоторного топлива на технологическом транспорте. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):73-81. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-73-81>.

EXPERIENCE IN THE USE OF LIQUEFIED NATURAL GAS AS A GAS MOTOR FUEL IN TECHNOLOGICAL TRANSPORT

G. M. Dubov[✉], M. Y. Yatsevich, D. A. Boronenkov, D. M. Yakobson

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

✉ dubovgm@kuzstu.ru

Abstract: The article analyzes the prospects for using liquefied natural gas (LNG) as a motor fuel in industrial transport. Key aspects of LNG application are considered, including its environmental, technogenic and economic benefits compared to traditional fuels. International experience of using LNG in different countries, such as China, India, Iran, Egypt, Brazil and others, where this type of fuel has become widespread, is described. The key features and an example of LNG transportation and refueling infrastructure at mining sites are considered. Particular attention is paid to Russian experience and problems associated with the development of LNG infrastructure.

Keywords: liquefied natural gas (LNG), gas motor fuel, technological transport, gas motor fuel, environmental and man-made advantages, economic efficiency

For citation: Dubov GM, Yatsevich MY, Boronenkov DA, et al. Experience in the use of liquefied natural gas as a gas motor fuel in technological transport. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(3):73-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-73-81>.

Введение

В настоящее время транспортная сфера активно ищет альтернативные источники энергии для повышения производительности и снижения воздействия на окружающую среду. Это связано еще и с тем, что запасы сырья для традиционных видов топлива, таких как нефть, постепенно истощаются, и необходимо искать им замену.

В последние годы в транспортной сфере все более явно прослеживается тенденция к использованию различных типов топлива. Сложность заключается в том, что пока нет однозначного решения о полной замене дизельного топлива и бензина каким-то другим видом топлива. Необходимо отметить, что даже электромобили и автомобили на водородном топливе функционируют не только на возобновляемых источниках, их работоспособность во многом зависит от классического топлива.

В России природный газ остается одним из ключевых источников энергии. Например, около 60,7 % всей вырабатываемой электроэнергии приходится на тепловые электростанции (ТЭС), причем более половины этой доли – 47,8 % – генерируется именно на газовых станциях. Атомные станции производят 19,7 %, гидроэлектростанции – 19,1 %, тогда как другие источники, включая зеленую энергетику, составляют всего около 0,5 % [1].

Природный газ – дешевый и экологически чистый. В России его разведанные запасы насчитывают более 27 триллионов кубометров. Поэтому у страны есть хорошие перспективы для возможности развития его применения в различных отраслях, включая использование в качестве газомоторного топлива (ГМТ).

Современные тренды в области мировой торговли сжиженным природным газом (СПГ) приводят к изменениям в маршрутах международных магистральных трубопроводов и расширяют потенциальные рынки сбыта. Эти процессы не только ускоряют развитие технологий в сфере экспорта и импорта природного газа, но и подталкивают к разработке и внедрению новых проектов, связанных с использованием СПГ, учитывая его сильные и слабые стороны.

Цель исследования: анализ потенциала использования сжиженного природного газа в качестве альтернативного моторного топлива в транспортной отрасли с акцентом на его экологические, экономические и техногенные преимущества, а также оценка текущего состояния и перспектив развития инфраструктуры СПГ в России и за рубежом.

Особое внимание уделено применению СПГ в технологическом транспорте, в частности в карьерной технике, с целью выявления эффективности и целесообразности его внедрения в условиях горнодобывающей промышленности.

Методы исследований

В работе использованы следующие методы:

- аналитический метод – для изучения статистических данных по использованию СПГ в различных странах мира, включая объемы потребления, количество заправочных станций и автопарков;
- сравнительный анализ – для сопоставления СПГ с традиционными видами топлива (дизель, бензин) по экологическим, экономическим и эксплуатационным характеристикам;
- обобщение практического опыта – на основе кейсов внедрения СПГ в транспортных системах различных стран, включая Россию, Китай, Индию, страны ЕС и Латинской Америки;
- технико-экономический анализ – для оценки эффек-

тивности использования СПГ в карьерной технике, включая расчет экономии топлива, снижение выбросов и окупаемость инвестиций;

– эмпирический метод – на основе данных, полученных в ходе эксплуатации газодизельных и газовых карьерных самосвалов «БелАЗ», а также других видов техники, работающих на СПГ.

Результаты работы

Сравнение сжиженного природного газа с традиционными видами моторных топлив

СПГ имеет ряд преимуществ перед традиционными видами моторных топлив, такими как бензин и дизельное топливо. Благодаря наличию этих преимуществ СПГ активно конкурирует на рынке моторного топлива с традиционным топливом. Основные причины актуальности применения СПГ заключаются в экономическом, экологическом и техногенном аспектах.

Экологический аспект. В сравнении с нефтяными видами моторных топлив (бензин и дизель) СПГ оказывает менее пагубное воздействие на окружающую среду. Это связано с тем, что транспорт, работающий на СПГ, выделяет меньше вредных и канцерогенных веществ. К примеру, выбросов оксида серы (SO_x) в значительной степени меньше от автомобилей, работающих на СПГ, так как в нем практически не содержится сернистых соединений, а именно оксид серы является первоисточником появления кислотных дождей. Стоит отметить, что основным выбросом от использования СПГ является углекислый газ (CO_2), но даже его влияния значительно меньше по сравнению с традиционными нефтяными видами топлив.

Техногенный аспект. Двигатели, работающие на СПГ, менее шумные по сравнению с двигателями, работающими на традиционном топливе. Это особенно важно для городских условий, где шумовой фон может оказывать негативное воздействие на здоровье людей. Также стоит отметить, что двигатели на СПГ выделяют значительно меньше копоти и твердых частиц, что улучшает качество воздуха и облегчает обслуживание двигателя.

Экономический аспект. Экономическая выгода использования СПГ связана прежде всего с его стоимостью. В большинстве регионов мира СПГ оказывается дешевле традиционных нефтяных видов топлив. Это связано с тем, что добыча и переработка природного газа часто обходится дешевле, чем производство нефти и ее последующая переработка. Кроме того, переход на СПГ позволяет снизить затраты на техническое обслуживание автомобилей, так как двигатели на этом виде топлива работают дольше без необходимости замены масла и других расходных материалов.

Опыт использования сжиженного природного газа в качестве газомоторного топлива в мире

Существуют два способа использования метана в качестве моторного топлива на транспорте: в сжатом виде (КПГ) и сжиженном виде (СПГ).

Основное различие между ними заключается в способе хранения газа. КПГ хранится в баллонах под высоким давлением (200–250 бар), тогда как СПГ находится в специальных криогенных резервуарах при температуре -160°C . Главное преимущество СПГ перед КПГ состоит в значительном уменьшении занимаемого объема (примерно в 600 раз), что упрощает транспортировку топлива и увеличивает запас хода автомобиля благодаря высокой энергетической плотно-

сти. При использовании КПП требуется установка множества баллонов, что уменьшает полезный объем и грузоподъемность транспортного средства [2].

В настоящее время газомоторное топливо уже получило широкое распространение во многих странах мира. Однако Россия, обладая одними из самых крупных запасов природного газа, существенно отстает по уровню потребления этого вида топлива. По разным оценкам, в мире существует около 30 млн машин, которые работают на природном газе. Большинство этих машин, около 20,5 млн, находится в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Самая высокая плотность этих автомобилей наблюдается в Китае, Иране, Индии и Пакистане (примерно 8,5, 6,2, 4,3 и 4,2 млн единиц транспорта соответственно). Природный газ популярен в Южной Америке, особенно в Аргентине, Бразилии и Колумбии: количество машин, работающих на газе, достигает 3,0, 2,6 и 0,8 млн единиц соответственно. В России же парк газомоторных автомобилей насчитывает лишь 260 тысяч единиц [3, 14].

СПГ наиболее оптимально использовать для технологического транспорта, потребляющего значительные объемы топлива. Для легковых машин и легкого коммерческого транспорта он не так хорош из-за своих особенностей. Поэтому именно магистральные грузовики становятся ключевыми потребителями СПГ. Использование СПГ в качестве моторного топлива развивается сравнительно недолго и сейчас парк магистральных тягачей, работающих на СПГ, включает около 450 тысяч единиц в Китае, 40 тысяч в Европе и около 5 тысяч в России. В Китае действует 4 100 криогенных заправочных станций, в Европейском союзе – 635, а в России – около 17 [4].

Рассмотрим опыт ключевых стран по применению СПГ в качестве газомоторного топлива.

Европейские региональные различия в плотности сети заправочных станций СПГ выглядят следующим образом:

- Испания, Португалия, Великобритания, Нидерланды и Северная Италия – относительно хорошее предложение;
- Франция и Бельгия за последние два года активно развивались;
- Польша и Германия – начало расширения сети;
- Скандинавия обычно ассоциируется с Био-СПГ.

Евросоюз (ЕС) уделяет особое внимание декарбонизации (в отличие от Китая, уделяющего особое внимание загрязнению воздуха). В ЕС работает программа финансирования инвестиций в инфраструктуру (до 50 % финансирования).

Германия. Компания Dena выступает модератором целевой группы по СПГ – в ноябре 2015 года создана совместная инициатива целевой группы по СПГ для большегрузных автомобилей. Заявленная цель поможет устранить препятствия для инвестиций и расширения использования СПГ в качестве топлива в Германии. СПГ – единственная доступная в настоящее время экономичная и экологичная альтернатива для большегрузных автомобилей. С момента предоставления финансирования было подано 1 390 заявок на гранты (994 грузовика на СПГ). По данным DENA, к 2025 году 25 тысяч грузовиков будут зарегистрированы на СПГ.

Франция. Дизельное топливо дает мощный импульс развитию газовых грузовиков, но вступили в силу налоговые льготы. В октябре 2015 года налог на дизельное топливо увеличился на 1 цент и еще раз – в 2017 году. Заявленная цель – вытеснение дизельного топлива. Произошло сокращение

налогооблагаемого дохода на 40 % от стоимости грузовика, работающего на СПГ.

Италия. С 1930 года Италия рассматривает природный газ в качестве топлива для транспортных средств, накопив большой научный, технический, промышленный и деловой опыт. По данным на 2019 год, статистика выглядит следующим образом: 1,7 млрд евро общего оборота, 90 лет опыта применения СПГ, 1 200 тысяч легковых автомобилей на СПГ, 2 600 грузовых автомобилей на СПГ, 1 350 заправочных станций, 20 тысяч сотрудников, 6 тысяч мастерских по модернизации транспорта.

Китай. Примерно 450 тысяч тяжелых грузовиков работает на природном газе. Около 4 100 объектов газозаправочной инфраструктуры при 160 тысячах традиционных заправок [3].

Иран. Иран сэкономил порядка 370 млн литров топлива, при переводе 213 тысяч единиц общественного транспорта на природный газ за два года, что в денежном выражении составляет порядка 126 млн долларов сокращения расходов бюджета. К 2026 году планируется завершить перевод 1,2 млн транспортных средств на природный газ. Для этих целей на государственном уровне был заключен контракт с 330 пунктами переоборудования [3].

Египет. Министр энергетики поручил перевести 100 тысяч автомобилей на природный газ в 2023 году. Дополнительно планируется построить 700 объектов газозаправочной инфраструктуры. В 2022 году среднее потребление газа в качестве моторного топлива составило 95 млн м³/мес. [3].

Индия. Нитин Гадкари – министр транспорта Индии утвердил направление развития автомобильного транспорта на природном газе в качестве стратегического (прим. СПГ). По словам министра, множество проблем с батареями при эксплуатации электромобилей в режиме высоких температур стали одной из ключевых причин отказа от электромобилей. На начало 2023 года в Индии насчитывалось 5 040 объектов газозаправочной инфраструктуры. Планируется расширение до 10 тысяч объектов в течение 10 лет. Цели экономики Индии подразумевают увеличить долю потребления газа с 7 до 15 %, сократить зависимость от импорта сырой нефти и расходы на импорт на 10 %, выполнять обязательства 21-й конференции сторон участников Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP21). С 2014 по 2019 год (за 5 лет) произошло увеличение ~100 % числа заправок сжатого природного газа (с 938 до 1 815), увеличение на ~80 % количества автомобилей на природном газе (с 1 945 103 до 3 503 215).

В таблице представлены уровень развития применения СПГ в 2019 году и перспективы применения до 2030 года [3].

Таблица / Table

**Опыт Индии по применению сжиженного природного газа в качестве газомоторного топлива /
India's experience in using LNG as a gas engine fuel**

Характеристика	Показатель
Общий объем транспортных средств, использующих природный газ, в 2019 г.	3,5 млн
Общий объем транспортных средств, которые будут работать на природном газе к 2030 г.	30 млн
Количество заправочных станций для сжиженного природного газа в 2019 г.	1 815
Количество заправочных станций для СПГ к 2030 г.	8 303

Латинская Америка в целом

Сейчас в странах Латинской Америки примерно 5,5 млн машин работают на природном газе и более 5 700 заправочных станций, предлагающих это топливо. Аргентина и Бразилия – страны с наиболее развитыми рынками. В Боливии успешно реализуется программа перевода автомобилей на природный газ, продвигаемая национальным правительством. В Колумбии и Перу созданы крупные автопарки городских автобусов, использующих сжатый природный газ, при этом их развитие активно поддерживается государственными органами. Латинская Америка занимает второе место в мире по числу автомобилей, работающих на природном газе, после Азиатско-Тихоокеанского региона (свыше 19 млн единиц транспорта). Аргентина, Бразилия и Колумбия входят в число десяти стран с самым большим парком автомобилей, работающих на природном газе, а также с наибольшим количеством газовых заправок. Все они входят в топ-10 стран по запасам газа.

Бразилия. В 2022 года около 140 тысяч автомобилей перешли на природный газ. Рост ~2,6 млн транспортных средств на природном газе числится в Бразилии на конец 2022 года, из них ~1,6 млн – в Рио-де-Жанейро [3]. Бразилия является второй страной в Латинской Америке по количеству автомобилей с природным газом. Штат Рио-де-Жанейро располагает крупнейшим в стране парком автомобилей на природном газе. Министр энергетики Бразилии объявил, что страна планирует перевести парк грузовиков на природный газ. Они также планируют заменить тепловые электростанции, работающие на дизельном топливе, на другие, работающие на природном газе, пока истекают их контракты.

Боливия. В стране насчитывается более 390 тысяч транспортных средств на природном газе и около 250 заправочных станций сжатого природного газа. Исполнительная организация по переводу транспортных средств на природный газ (EEC-GNV) объявила о том, что 25 % автопарка Боливии переведено на КПП, что позволило сэкономить стране более 275 млн долларов США. Экспоненциальный рост поддерживается правительством страны посредством программы перевода автомобилей на природный газ с целью изменения энергетической сети страны, реализуемой Министерством углеводородов.

Мексика. В долине Мехико выбросы, генерируемые транспортными средствами, составляют до 60 % от общего загрязнения грубыми взвешенными частицами согласно исследованиям ООН. Самое тревожное то, что, по данным Всемирной организации здравоохранения, более 14 тысяч человек умирает в стране каждый год из-за болезней, связанных с загрязнением воздуха. В этом смысле использование КПП обеспечивает жизненно важные экологические преимущества. Кроме того, в Мехико транспортные средства, работающие на КПП, могут получить голограмму «0», которая освобождает их от программы «Нуо Но Сиркула» (политика ограничения движения, направленная на снижение заторов на дорогах). Рост рынка автомобилей на природном газе в Мексике идет экспоненциально, и об этом свидетельствуют огромный взлет и импульс, которые наблюдаются в последние годы. Теперь отрасль стремится в полной мере использовать работу этого бизнеса, чтобы воспользоваться экономическими и экологическими преимуществами этого топлива.

Нигерия. Реализуется соглашение между правительством

Исламской Республики Иран и Федеративной Республики Нигерия на 2,5 млрд долларов о создании порядка 70 центров по переоборудованию транспорта на метан. Планируется поставка комплектов для переоборудования более чем 1 млн транспортных средств и создание 1 тысячи объектов заправочной инфраструктуры.

Инфраструктура транспортировки, хранения и заправки сжиженного природного газа

При рассмотрении вопроса использования сжиженного природного газа на производственных объектах крайне важно уделить внимание инфраструктуре доставки, хранения и условий заправки газом. Без наличия развитых логистических схем и адекватных условий хранения внедрение СПГ становится затруднительным или вовсе невозможным.

Для транспортировки СПГ требуются специальные транспортные средства, способные поддерживать сверхнизкую температуру, необходимую для сохранения газа в жидком состоянии. Температура кипения СПГ составляет около -162 °С, что предъявляет особые требования к материалам и технологиям, применяемым в транспорте. Используются криогенные автоцистерны, танк-контейнеры и железнодорожные цистерны, специально разработанные для перевозки СПГ. Эти транспортные средства оснащены многослойной изоляцией и системами поддержания вакуума, что предотвращает нагревание газа и его испарение.

Эффективная логистика доставки СПГ включает планирование маршрутов, учет особенностей местности и обеспечение доступности транспортных путей. Необходимо предусмотреть регулярные поставки газа, учитывая расстояние между местами добычи/производства и потребителями. Это особенно важно для удаленных объектов, таких как карьеры или горнодобывающие площадки, где наличие постоянного источника топлива критично важно для обеспечения непрерывного производственного процесса. Безопасность транспортировки СПГ является приоритетом. Важно соблюдать строгие нормы и стандарты, касающиеся загрузки, разгрузки и движения транспорта. Специальные меры предосторожности включают мониторинг состояния цистерн, регулярное тестирование материалов и контроль над процессом охлаждения газа.

Помимо доставки, важным вопросом является процесс заправки техники, использующей СПГ. Эта техника требует специфического подхода к обслуживанию, включая систему заправочных станций и квалификацию обслуживающего персонала. Особенно это актуально для карьерной техники, которая работает в условиях высоких нагрузок и экстремальных температур. Учет этих нюансов важен для обеспечения бесперебойной работы производственного цикла.

Для долгого хранения СПГ используют специальные резервуары, которые выдерживают экстремальные холода. Они имеют многослойную теплоизоляцию и поддерживаемый вакуум. Это минимизирует передачу тепла и предотвращает нагрев газа. Резервуары бывают разных размеров и форм. Современные резервуары оснащены автоматическими системами контроля уровня жидкости, давления и температуры. Это позволяет следить за состоянием газа в реальном времени и предотвращать аварии. Есть системы регулировки давления, чтобы избежать перегрева и излишнего испарения газа. Места установки резервуаров должны быть защищены от пожаров, наводнений и землетрясений. Важно учитывать

климатические условия, так как они влияют на эффективность хранения газа.

Ярким примером созданной полноценной инфраструктуры по заправке СПГ газодизельных карьерных самосвалов «БелАЗ-75131» на участках горных выработок угольных разрезов можно считать проект, реализованный в Кузбассе. Малотоннажное производство СПГ и его последующая транспортировка на участки горных выработок осуществляется силами ООО «Сибирь-Энерго» (г. Новокузнецк) (рис. 1).



Рис. 1. Завод по сжижению природного газа (г. Новокузнецк) /
Fig. 1. Natural gas liquefaction plant (Novokuznetsk)

При этом для транспортировки СПГ используются мобильные криогенные передвижные автозаправщики (рис. 2).



Рис. 2. Криогенные передвижные автозаправщики /
Fig. 2. Cryogenic mobile gas stations

Заправка газодизельных карьерных самосвалов «БелАЗ-75131» осуществляется на участках горных выработок на специализированных заправочных площадках непосредственно с мобильных криогенных передвижных автозаправщиков (рис. 3) [5].



Рис. 3. Заправочная площадка сжиженного природного газа на участках горных выработок угольного разреза в Кузбассе /
Fig. 3. LNG refueling site at the mining sites of a coal mine in Kuzbass

Реализация подобного рода транспортно-заправочной инфраструктуры позволила бесперебойно и круглосуточно обеспечивать необходимым запасом СПГ газодизельных карьерных самосвалов «БелАЗ-75131» и осуществлять оперативное и мобильное перемещение заправочной площадки в зависимости от продвижения разрабатываемого угольного разреза.

Российский опыт использования сжиженного природного газа в качестве газомоторного топлива

Актуальность перехода на газомоторное топливо обуславливается сокращением расходов на горючее. Если смотреть глобально, то переход потенциально может благоприятно сказаться на экономическом развитии страны. Это связано с тем, что Россия обладает обширной территорией, и значительная часть себестоимости товаров приходится на транспортировку этих товаров от производителя к потребителю. Например, использование автомобилей «КамАЗ-5490 NEO», работающих на сжиженном природном газе или дизельном топливе (ДТ), показывает, что капитальные вложения в приобретение этих машин окупаются при пробеге около 220 тысяч километров, после чего эксплуатация транспорта на СПГ становится экономически выгоднее (рис. 4).

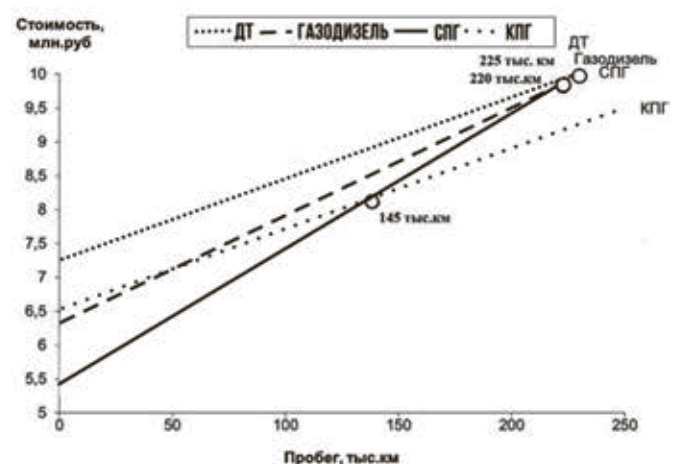


Рис. 4. Определение точек окупаемости переплат на покупку газовых аналогов «КамАЗ-5490 NEO» /

Fig. 4. Determination of payback points for overpayments for the purchase of KAMAZ 5490 NEO gas analogues

Применение компримированного природного газа (КПГ) ограничено из-за расположения автомобильных газовых наполнительных компрессорных станций (АГНКС) и небольшого запаса хода транспортных средств. Поэтому он лучше всего подходит для городских и пригородных маршрутов, включая общественный транспорт, коммунальную технику и коммерческий транспорт, работающий в пределах города. Если строительство такой инфраструктуры невозможно из-за нехватки сетевого газоснабжения, то в качестве альтернативы можно рассмотреть применение сжиженного природного газа (СПГ).

Использование машин на газе в городах помогает уменьшить загрязнение воздуха и шум от моторов, что улучшает качество жизни горожан. Примеры внедрения СПГ-автобусов включают проекты в Санкт-Петербурге и Магнитогорске Челябинской области, где совокупно используется около 2 500 автобусов на СПГ. Коммунальные машины на СПГ также применяются в Якутске (Республика Саха – Якутия) [6, 7].

Кроме того, перевод общественного и коммунального транспорта на природный газ требуется для исполнения распоряжения Правительства Российской Федерации.

В этом документе указаны цели по использованию природного газа на транспорте в городах с различной плотностью населения [8]:

- в городах с более чем 1 млн жителей – до 50 % автобусов и коммунальной техники;
- в городах с более чем 300 тысяч жителей – до 30 %;
- в городах с более чем 100 тысяч жителей – до 10 %.

Медленные темпы перевода на альтернативное топливо, такое как СПГ, обусловлены недостаточной развитостью производственной и сбытовой инфраструктуры. Большая часть действующих заправок сосредоточена в европейской части страны, обслуживая транспортные потоки между крупными городами, за исключением важного южного направления. На Дальнем Востоке заправки ориентированы преимущественно на удовлетворение потребностей корпораций, что сдерживает развитие СПГ-транспортировки. Недостаток малотоннажных комплексов СПГ, работающих на полную мощность, также затрудняет ускоренное строительство широкой сети заправочных станций (рис. 5).



Рис. 5. Текущее состояние производственно-сбытовой инфраструктуры сжиженного природного газа в России /

Fig. 5. Current state of LNG production and distribution infrastructure in Russia

Анализ применения сжиженного природного газа на карьерном транспорте

На сегодняшний день добыча полезных ископаемых открытым способом требует значительных затрат на транспортировку горной массы. В основном на карьерах для транспортировки используются тяжелые карьерные самосвалы с дизельными двигателями.

В настоящее время в российских горнодобывающих компаниях активно эксплуатируются карьерные самосвалы «БелАЗ» различной грузоподъемностью. С учетом растущих экологических и экономических требований к разработке полезных ископаемых открытым способом все больше проектов направлено на модернизацию этого типа карьерного транспорта. Например, в Кузбассе группа компаний успешно завершила проект по модернизации 70 карьерных самосвалов «БелАЗ-75131», оборудованных дизельными двигателями внутреннего сгорания, для дальнейшей эксплуатации с частичным замещением дизельного топлива сжиженным природным газом – метаном.

В рамках реализации проекта данные карьерные самосвалы были адаптированы под эксплуатацию в газодизельном

режиме и успешно работают на производственных площадках угледобывающих разрезов (рис. 6) [9].



Рис. 6. Газодизельные карьерные самосвалы «БелАЗ-75131» /
Fig. 6. BelAZ 75131 diesel mining dump trucks

Карьерные самосвалы, работающие на газодизельной смеси, вызывают значительный интерес. Использование газа, частично замещающего дизельное топливо, увеличило энергоэффективность транспортировки горных пород до 20 %. Сократило расходы на топливо более чем на 30 %. Заказчик может достичь экономического эффекта до 8,5 млн рублей в год благодаря использованию этой машины [10].

Исследования, проведенные учеными КузГТУ, касающиеся экологической эффективности использования 130-тонных газодизельных самосвалов «БелАЗ-75131», продемонстрировали их превосходство над дизельными аналогами. Это выражается в том числе и в снижении выбросов углекислого газа (CO_2) на 5–10 % (рис. 7), а также других канцерогенных соединений. Уровень задымленности (загазованности) на промышленных площадках горнодобывающих предприятий снижается. Это особенно важно зимой в Сибири, когда техника работает при низких температурах окружающей среды [9].

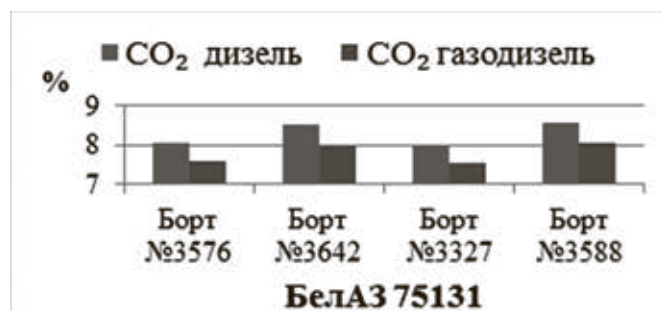


Рис. 7. Уровни CO_2 в отработавших газах при работе карьерных самосвалов «БелАЗ-75131» на дизельном и газодизельном топливе /

Fig. 7. CO_2 levels in exhaust gases during operation of BelAZ 75131 diesel and gas-diesel dump trucks

Компанией ОАО «БЕЛАЗ» в 2022 году был впервые представлен 90-тонный газовый самосвал модели «БелАЗ-7558Н». Данный карьерный самосвал работает на чистом сжиженном природном газе и оснащен емкими криогенными топливными баками суммарным объемом 1 740 литров, что позволяет работать без дозаправки около 10–11 часов.

В этом же году компания также представила новую модель карьерного самосвала с газовым поршневым двигателем – 30-тонный «БелАЗ-7540S». Помимо этого, ОАО «БЕЛАЗ» выпустило первый газовый самосвал на 45 тонн. Его испытания в реальной работе прошли в компании «Алроса» и продемонстрировали существенное уменьшение выбросов за-

грязняющих веществ в атмосферу до 10 раз, при этом затраты на топливо снизились в два раза по сравнению с дизельной версией. Клиенты могут сэкономить до 4 млн рублей ежегодно благодаря использованию этого автомобиля, что зависит от наличия газовых заправочных станций и стоимости газа у поставщиков. И, наконец, одной из последних инноваций компании является выпуск в 2024 году первого газового самосвала «БелАЗ-7513Р» грузоподъемностью 130 тонн, использующего в качестве моторного топлива только сжиженный природный газ метан. По расчетам специалистов, при эксплуатации данного 130-тонного карьерного самосвала на СПГ экономия на топливе по сравнению с классическим дизельным аналогом может составить от 10 млн рублей в год [11, 12].

Полученный уникальный опыт эксплуатации карьерных самосвалов различной грузоподъемности как газодизельных, так и чисто газовых с использованием в качестве моторного топлива сжиженного природного газа позволил трансформировать полученные инновационные технические решения на другие виды карьерной техники [15].

Так, в 2023 году в Кузбассе при участии компании «ТехноЭко» прошел успешные испытания первый отечественный газовый бульдозер «ЧЕТРА-Т11» (рис. 8). Бульдозер оснащен криогенной бортовой топливной системой, а также газовым двигателем китайского производства, что позволяет использовать на нем в качестве моторного топлива только СПГ [13].

Отдельно стоит отметить инновационные технические решения, примененные в самосвалах «БелАЗ-7513», оснащенных электрической трансмиссией и мотор-колесами. Такие конструкции действительно обладают рядом преимуществ перед традиционной техникой с двигателями внутреннего сгорания (ДВС).

Электрическая трансмиссия позволяет передавать мощность непосредственно на колеса, минуя механические передачи, что снижает потери энергии и повышает общую эффективность транспортного средства. Это особенно важно для тяжелой карьерной техники, работающей в условиях постоянных высоких нагрузок. Более того, сочетание электродвигателей с газодизельным двигателем делает возможным оптимизацию расхода топлива и снижение выбросов CO_2 .

Традиционные ДВС часто работают неэффективно в условиях переменной нагрузки, тогда как система с электрической трансмиссией позволяет поддерживать постоянную нагрузку на двигатель, обеспечивая максимальную производительность и минимальное загрязнение окружающей среды.

Таким образом, применение таких технических решений в карьере имеет потенциал для значительного повышения экономической и экологической эффективности работы предприятия.

Заключение

1. Сжиженный природный газ обладает значительными преимуществами по сравнению с традиционными видами топлива: он экологичнее, дешевле в эксплуатации и способствует снижению уровня шума и загрязнения воздуха.

2. Мировой опыт использования сжиженного природного газа в транспортной отрасли, особенно в тяжелом и технологическом сегменте, показывает его значительный потенциал как экологичной, технологичной и экономически выгодной альтернативы традиционным нефтепродуктам: СПГ имеет меньшую массу выбросов вредных веществ, сокращает эксплуатационные расходы и способствует уменьшению зависимости от бензина и дизеля (примером служат Китай, Индия, страны ЕС и Латинской Америки, где использование СПГ стабильно растет).

3. В России, несмотря на богатые запасы природного газа, внедрение СПГ замедлено из-за недостатка инфраструктуры, ограниченного доступа к технологиям и невысокой активности научно-исследовательских работ в этой области. Тем не менее успешные примеры применения СПГ в карьерной технике, такие как самосвалы «БелАЗ» и бульдозеры «ЧЕТРА», демонстрируют снижение выбросов CO_2 на 5–10 %, экономию топлива до 30 % и снижение эксплуатационных затрат, а развитие мобильных криозаправщиков, малотоннажных заводов СПГ и государственные инициативы создают реальные предпосылки для ускоренного перехода России на этот перспективный и конкурентоспособный альтернативный энергоноситель.

Выводы

1. В статье приведены результаты исследований, демонстрирующие экологические, экономические и техногенные преимущества использования сжиженного природного газа (СПГ) в транспортной отрасли, включая данные по снижению выбросов CO_2 на 5–10 %, экономии топлива до 30 % и уменьшению эксплуатационных затрат на примере карьерной техники и магистральных грузовиков, а также рассмотрены мировые тенденции и опыт развития СПГ-инфраструктуры в России и других странах.

2. Результаты исследований могут быть полезными при разработке стратегий перехода на альтернативные моторные топлива в транспортном секторе, планировании и внедрении инфраструктуры СПГ-заправок, оптимизации эксплуатации карьерной и тяжелой техники, а также при формировании государственной политики и бизнес-инициатив, направленных на повышение экологической безопасности и экономической эффективности транспортных систем с использованием сжиженного природного газа.



Рис. 8. Газовый бульдозер «ЧЕТРА-Т11» / Fig. 8. CHETRA T11 gas bulldozer

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. СО ЕЭС: «Доля ВИЭ, ГЭС и АЭС в выработке РФ к 2050 году вырастет с 39,3 до 56,8 %». *Переток.ру*. [The system operator of the Unified Energy System: "The share of renewable energy sources, hydroelectric power plants and nuclear power plants in the Russian Federation's generation will grow from 39.3% to 56.8% by 2050" (In Russ.)]. URL: <https://peretok.ru/news/strategy/24512>.
2. Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: Сборник научных трудов по материалам 82-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ. Москва, 2024: 320. [Actual issues of technical operation and auto service of rolling stock of automobile transport: Collection of scientific papers based on the materials of the 82nd scientific-methodical and scientific-research conference of MADI. Moscow, 2024: 320 (In Russ.)]
3. Бургазлиев С. Развитие газомоторного транспорта в мире. Возможности России для новой программы развития газомоторного топлива. *Итоги выставки GASSUF-2023: презентации спикеров*. Москва, 2023. [Burgazliev S. Development of gas motor transport in the world. Russia's opportunities for a new program for the development of gas motor fuel. *Results of the GASSUF 2023 exhibition: speaker presentations*. Moscow, 2023 (In Russ.)]. URL: <https://ngvrus.ru/news/2023/10/30/itogi-vystavki-gassuf-2023.html>.
4. Пронин ЕП. Рынок газомоторных транспортных средств в текущих условиях: перспективы развития производства и расширение модельного ряда газомоторного транспорта и техники. *Итоги выставки GASSUF-2023: презентации спикеров*. [Pronin EP. The market of gas motor vehicles in the current conditions: prospects for the development of production and expansion of the model range of gas motor vehicles and equipment. *Results of the GASSUF 2023 exhibition: speaker presentations*. Moscow, 2023 (In Russ.)]. URL: <https://ngvrus.ru/news/2023/10/30/itogi-vystavki-gassuf-2023.html>.
5. Дубов ГМ, Трухманов ДС, Чегошев АА и др. Снижение техногенного воздействия на окружающую среду посредством использования альтернативных видов энергоносителей при эксплуатации тяжелых карьерных самосвалов. *Горное оборудование и электромеханика*. 2021;5(157):19-28. [Dubov GM, Tryhmanov DC, Chegoshev AA, et al. Reducing the anthropogenic impact on the environment through the use of alternative energy sources during the operation of heavy mining dump trucks. *Mining equipment and electromechanics*. 2021;5(157):19-28 (In Russ.)]. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-5-19-28.
6. Российский рынок газомоторного топлива: достижимы ли амбициозные цели? *Neftegaz.RU*. [Russian gas motor fuel market: are ambitious goals achievable? *Neftegaz.RU* (In Russ.)]. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/rynok/740267-rossiyskiy-rynok-gazomotornogo-toplivados-tizhimi-li-ambitsioznye-tseli>.
7. Шатров МГ, Яковенко АЛ, Кричевская ТЮ. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие. Москва, 2014: 23. [Shatrov MG, Yakovenko AL, Krichevskaya TYu. Noise of automobile internal combustion engines. Study guide. Moscow, 2014: 23 (In Russ.)]
8. О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива, в том числе природного газа в качестве моторного топлива: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.05.2013 № 767-р. [Order of the Government of the Russian Federation dated 13.05.2013 No. 767-r "On regulation of relations in the sphere of use of gas motor fuel, including natural gas as a motor fuel (In Russ.)]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001201305170003>.
9. Дубов ГМ, Нохрин СА, Ходоровский СК и др. Сжиженный природный газ, как перспективный вид моторного топлива для карьерных самосвалов. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023;23:205-13. [Dubov GM, Nokhrin SA, Khodorovsky SK, et al. Liquefied natural gas as a promising type of motor fuel for quarry dump trucks. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2023;23:205-13. (In Russ.)] DOI: 10.26160/2658-3305-2023-23-205-213.
10. БЕЛАЗ-7558Н: первый в мире 90-тонный самосвал на сжиженном природном газе. *Золото и технологии*. [BELAZ-7558N: the world's first 90-ton dump truck on liquefied natural gas. *Gold and technology* (In Russ.)] URL: <https://zolteh.ru/tekhnika/belaz-7558n-pervyy-v-mire-90-tonny-samosval-na-szhizhenom-prirodnom-gaze>.
11. Газовые самосвалы БЕЛАЗ. *Горная промышленность*. [BELAZ gas dump trucks. *Mining* (In Russ.)]. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/transport/18629-gazovye-samosvaly-belaz>.
12. Карьерные самосвалы на газовом топливе. *Золото и технологии*. [Gas-fueled quarry dump trucks. *Gold and technology* (In Russ.)]. URL: <https://zolteh.ru/tekhnika/karernye-samosvaly-na-gazovom-toplive>.
13. Дубов ГМ, Дворовенко ИВ, Нохрин СА. Природный газ как перспективная альтернатива дизельному топливу для карьерной техники. *Развитие производительных сил Кузбасса: история, современный опыт, стратегия будущего: мат-лы Межд. науч.-практ. конф.: в 4 т.* Москва, 2024:244-9. [Dubov GM, Dvorenko IV, Nokhrin SA. Natural gas as a promising alternative to diesel fuel for quarry equipment. *Development of productive forces of Kuzbass: history, modern experience, strategy of the future: Proceedings of the International scientific and practical conference. In 4 volumes*. Moscow, 2024:244-9 (In Russ.)]
14. Марков ВА. Проблемы использования природного газа в качестве моторного топлива для городского автотранспорта. *Грузовик*. 2015;4:6. [Markov VA. Problems of using natural gas as a motor fuel for urban vehicles. *Truck*. 2015;4:6 (In Russ.)]
15. Голубенко НВ. Об использовании природного газа в качестве моторного топлива в целях экологизации автотранспорта. *Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2015): сб. ст. VII Межд. науч.-техн. конф.* Курск, 2015: 32-4. [Golubenko NV. On the use of natural gas as motor fuel for the purpose of ecologisation of motor transport. *Modern Automobile Materials and Technologies (SAMIT-2015): collection of articles of the VII International Scientific and Technical Conference*. Kursk, 2015:32-4 (In Russ.)]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Георгий Михайлович Дубов –

канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: dubovgm@kuzstu.ru

Мария Юрьевна Яцевич –

канд. философ. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: yamu.phil@kuzstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Georgy Mikhailovich Dubov –

C. Sc. in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: dubovgm@kuzstu.ru

Maria Yurievna Yatseвич –

C. Sc. in Philosophy, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: yamu.phil@kuzstu.ru

Данил Александрович Бороненков –
аспирант, Кузбасский государственный технический
университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово,
Российская Федерация, e-mail: danil.boronenkov@inbox.ru

Danil Alexandrovich Boronenkov –
Post-graduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical
University, 650000, Kemerovo, Russian Federation,
e-mail: danil.boronenkov@inbox.ru

Даниил Максимович Якобсон – аспирант, Кузбасский
государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, Российская
Федерация, e-mail: daneel3000@gmail.com

Daniil Maximovich Yakobson –
Post-graduate Student, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical
University, 650000, Kemerovo, Russian Federation, e-mail:
daneel3000@gmail.com

Критерии авторства / Contribution:

Г. М. Дубов – научный менеджмент, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы; М. Ю. Яцевич – постановка исследовательской задачи, выводы, написание текста; Д. А. Бороненков – проведение исследований, обработка результатов; Д. М. Якобсон – обзор литературы, сбор и анализ данных. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи / G.M. Dubov – research management, conceptualisation of the study, data collection and analysis, conclusions; M. Yu. Yatsevich – setting the research problem, conclusions, writing the text; D. A. Boronenkov – research management, processing of results; D. M. Yakobson – literature review, data collection and analysis. All authors read and approved the final version of the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 13.03.2025.

Поступила после рецензирования: 12.04.2025.

Принята к публикации: 24.06.2025.

Article info

Received: 13.03.2025.

Revised: 12.04.2025.

Accepted: 24.06.2025.



**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО
ОСВОЕНИЯ НЕДР ИМ. АКАДЕМИКА
Н.В. МЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Институт проблем комплексного освоения недр
им. Академика Н.В. Мельникова Российской академии наук
оказывает консалтинговые услуги
по научно-техническому сопровождению проектной
документации

В ФАУ «ГЛАВГОСЭКСПЕРТИЗА РОССИИ»

Научно-техническое сопровождение осуществляется при экспертизе результатов инженерных изысканий, технической части проектной документации, а также при проверке достоверности определения сметной стоимости объектов капитального строительства.

В рамках научно-технического сопровождения возможно выполнение следующих видов работ:

1. Научная экспертиза принятых проектных решений.
2. Аудит проектной документации (ПД).
3. Выдача рекомендаций по корректировке ПД.
4. Корректировка пакета документов в соответствии с постановлением Правительства РФ №87 от 02.08.2008 года «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» для сдачи ПД в ФАУ «Главгосэкспертиза России» и сопровождение ПД при процедуре входного контроля.
5. Консультации по подготовке ответов на замечания экспертов ФАУ «Главгосэкспертиза России».
6. Консультации по разработке Специальных технических условий.

Контакты

111020, г.Москва, Крюковский туп., д.4

www.ипконран.рф | www.ipkonran.ru

+7 (916) 303-41-91

+7 (495) 360-89-60

ipkon-dir@ipkonran.ru

NEDRA 4.0

ИННОВАЦИИ, БЕЗОПАСНОСТЬ, УСТОЙЧИВОСТЬ

16–17 февраля 2026 | Санкт-Петербург

КОНГРЕСС ПО ЦИФРОВИЗАЦИИ И УСТОЙЧИВОМУ РАЗВИТИЮ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

130+

КОМПАНИЙ

300+

УЧАСТНИКОВ

35+

ДОКЛАДЧИКОВ

40+

СТЕНДОВ

100+

VIP-ВСТРЕЧ

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕМЫ ПРОГРАММЫ:

- Цифровая трансформация горнодобывающей отрасли
- Отечественные IT-решения и оборудование для добычи и переработки
- Цифровизация процессов добычи и обогащения
- Промышленная безопасность и защита данных
- Современные подходы для анализа данных в промышленности

0+



+ 7 495 198 63 40
nedra4@sbproject.ru

ПРИМИТЕ УЧАСТИЕ В ГЛАВНОМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ СОБЫТИИ
ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ!





2025
РОССИЯ

21-Й ГОРНЫЙ ФОРУМ И ВЫСТАВКА МАЙНЕКС РОССИЯ МАРАФОН ВОЗМОЖНОСТЕЙ

8 - 9 октября 2025 года,
Москва, Рэдиссон Славянская

УСЛОВИЯ УЧАСТИЯ



0+

minexrussia.ru