

Mining Science and Technology

Горные науки
и технологии

Vol. 8 №3
2023



<https://mst.misis.ru/>



Деятельность научно-практического журнала «Горные науки и технологии» (Mining Science and Technology (Russia)) направлена на развитие международного научного и профессионального сотрудничества в области горного дела.

Целевая аудитория журнала – исследователи, специалисты в области горного дела, представители академического и профессионального сообществ.

В журнале публикуются оригинальные статьи, описывающие результаты исследований, опыт реализации проектов в горнопромышленном комплексе, обзорные публикации.

Журнал стремится развивать такие междисциплинарные направления, как технологическая и экологическая безопасность, организация и управление проектами в горной промышленности, развитие территорий, правовые аспекты использования природных ресурсов и другие, которые способствуют прогрессу в горном деле и реализуются исследователями и практиками.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Петров Вадим Леонидович, проф., д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Казанин Олег Иванович, проф., д.т.н., Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Эпштейн Светлана Абрамовна, д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агиутантис Зак, проф., д-р наук, Университет Кентукки, г. Лексингтон, Кентукки, США

Богдасаров Максим Альбертович, проф., д.г.-м.н., Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина, г. Брест, Беларусь

Буи Суан Нам, проф., д-р наук, Ханойский университет горного дела и технологии, г. Ханой, Вьетнам

Валиев Нияз Гадым оглы, проф., д.т.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Герел Очир, проф., д.г.-м.н., Центр геолого-геофизических исследований, Монгольский университет науки и технологии, г. Улан-Батор, Монголия

Глигорич Зоран, проф., д-р наук, Белградский университет, г. Белград, Республика Сербия

Дребенштедт Карстен, проф., д-р наук, Технический университет Фрайбургская горная академия, г. Фрайбург, Германия

Дулати Ардежани Фарамарз, проф., д-р наук, Инженерный колледж, Тегеранский университет, г. Тегеран, Иран

Ершов Михаил Сергеевич, проф., д.т.н., Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

Журавлева Наталья Викторовна, проф., д.т.н., АО «Западно-Сибирский испытательный центр» (АО «ЗСИЦентр»), г. Новокузнецк, Российская Федерация

Илиаш Николае, проф., д.т.н., Университет Петрошани, г. Петрошани, Румыния

Кецоджевич Владислав, проф., д-р наук, Институт инженерного дела и минеральных ресурсов им. Бенджамина М. Статлера Университета Западной Вирджинии, г. Моргантаун, Западная Вирджиния, США

Клишин Владимир Иванович, проф., д.т.н., Институт угля Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация

Кошелев Владимир Николаевич, проф., д.х.н., Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

Кумар Джьянт, проф., д-р наук (геотехнический инжиниринг), Индийский институт науки (Indian Institute of Science), г. Бангалор, Индия

Макаров Владимир Александрович, проф., д.г.-м.н., Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Малафеев Сергей Иванович, проф., д.т.н., Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Российская Федерация

Мисников Олег Степанович, проф., д.т.н., Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Российская Федерация

Морозов Валерий Валентинович, проф., д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

Петров Игорь Михайлович, д.т.н., ООО «Исследовательская группа «Инфолайн», г. Москва, Российская Федерация

Раимжанов Бахадиржан Раимжанович, проф., д.т.н., Узбекский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт геотехнологии и цветной металлургии «O'zGEORANGMETLITI», г. Ташкент, Узбекистан

Ракишев Баян Ракишевич, проф., д.т.н., Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алма-Ата, Казахстан

Рестрепо Базна Оскар Хайме, проф., д-р наук, Национальный университет Колумбии, г. Медельин, Колумбия

Тарасов Вадим Петрович, проф., д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

Тибилов Денис Петрович, проф., д.э.н., Московский государственный институт международных отношений (Университет) Министерства иностранных дел России, г. Москва, Российская Федерация

Фейзуллаев Акпер Акпер оглы, проф., д.г.-м.н., Институт геологии и геофизики (ИГГ) Национальной Академии Наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

Хорешок Алексей Алексеевич, проф., д.т.н., Кузбасский государственный технический университет им. М.С. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

Шашенко Александр Николаевич, проф., д.т.н., Национальный горный университет, г. Днепр, Украина

Хардигора Моника, проф., д-р наук, Вроцлавский технологический университет, г. Вроцлав, Польша

Юрак Вера Васильевна, доц., д.э.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург; старший научный сотрудник, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭ УрО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация

ПЕРИОДИЧНОСТЬ 4 раза в год

ОСНОВАН в 2016 году

РЕГИСТРАЦИЯ

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 10 августа 2015 года.

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-62652.

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

Scopus, CAS, EBSCO, DOAJ, РИНЦ, ВИНТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

OPEN ACCESS Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ



МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
(НИТУ «МИСиС»)

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ

119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

Телефон: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.



Activities of the *Mining Science and Technology (Russia) (Gornye nauki i tekhnologii)* international journal are aimed at developing international scientific and professional cooperation in the field of mining.

The journal target audience comprises researchers, specialists in the field of mining, representatives of academic and professional communities.

The journal publishes original papers describing research findings, experience in the implementation of projects in mining industry, review publications.

The journal seeks to develop interdisciplinary areas that contribute to progress in mining, for example, technological and environmental safety, project organization and management in mining industry, development of territories, legal aspects of natural resource use, and other areas studied by researchers and practitioners. The journal always welcomes new developments. Papers are accepted in English or Russian.

EDITOR-IN-CHIEF

Vadim L. Petrov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF

Oleg I. Kazanin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National Mineral Resources University "University of Mines", St. Petersburg, Russian Federation

Svetlana A. Epshtein, Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Zach Agioutantis, Prof., Ph.D., University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA

Maksim A. Bogdasarou, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Brest State A. S. Pushkin University, Brest, Belarus

Xuan Nam Bui, Prof., Dr.Sci., Hanoi University of Mining and Geology, Duc Thang – Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

Carsten Drebenstedt, Prof., Ph.D., Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany

Faramarz Doulati Ardejani, Prof., Ph.D., Collège of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Mikhail S. Ershov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

Akper A. Feyzullaev, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Institute of Geology and Geophysics of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

Ochir Gerel, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Geoscience Center, the Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia

Zoran Gligorić, Prof., Dr.Sci. (Mining-Underground Mining), University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia

Monika Hardygora, Prof., Ph.D., Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland

Nikolae Ilias, Prof., Dr.Sci.(Eng.), University of Petrosani, Petrosani, Romania

Vladislav Kecojevic, Prof., Ph.D., Benjamin M. Statler College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA

Aleksey A. Khoreshok, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Vladimir I. Klishin, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Institute of Coal, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

Vladimir N. Koshelev, Prof., Dr.Sci.(Chem.), National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russian Federation

Jyant Kumar, Prof., Ph.D.-Geotech.Eng., Indian Institute of Science, Bengaluru, India

Vladimir A. Makarov, Prof., Dr.Sci.(Geol. and Min.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Sergey I. Malafeev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

Oleg S. Misnikov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Tver State Technical University, Tver, Russian Federation

Valery V. Morozov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Igor M. Petrov, Dr.Sci.(Eng.), Infomine Research Group LLC, Moscow, Russian Federation

Bakhadirzhan R. Raimzhanov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Uzbekistan Research, Design and Survey Institute for Geotechnology and Nonferrous Metallurgy – O'zGEORANGMETLITI, Tashkent, Uzbekistan

Bayan R. Rakishev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Alma-Ata, Kazakhstan

Oscar Jaime Restrepo Baena, Prof., Ph.D., National University of Colombia, Medellín, Colombia

Alexander N. Shashenko, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National Mining University, Dnipro, Ukraine

Vadim P. Tarasov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Denis P. Tibilov, Prof., Dr.Sci.(Econ.), Moscow State Institute of International Affairs (University) under the Ministry of Foreign Affairs of Russia, Moscow, Russian Federation

Niyaz G. Valiev, Prof., Dr.Sci.(Eng.), The Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

Natalia Zhuravleva, Prof., Dr.Sci.(Eng.), West Siberian Testing Center JSC (WSTCenter JSC), Novokuznetsk, Russian Federation

Vera V. Yurak, Assoc. Prof., Dr. Sci. (Econ.), Ural State Mining University, Yekaterinburg; Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

EDITORIAL COUNCIL

Yuri G. Agafonov, Assoc. Prof., Cand.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Michael R. Filonov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Leonid A. Plaschansky, Prof., Cand.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Yuri I. Razorenov, Prof., Dr.Sci.(Eng.), Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

EXECUTIVE SECRETARY

Daria P. Galushka, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

QUARTERLY

FOUNDED in 2016

REGISTRATION

The journal science and applied research journal is registered by the Federal Service for Communication, IT and Mass Communication Control on August 10, 2015.
Registration Certificate E-No. ФС77-62652

INDEXATION

Scopus, CAS, EBSCO, DOAJ, РИНЦ, ВИНТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

FOUNDER AND PUBLISHER



The National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS)

CONTACT

4 Leninsky Prospect, Moscow 119049, Russian Federation

Phone: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



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



СОДЕРЖАНИЕ

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Отходы переработки аподоломитового нефрита и направление их использования..... 195

Е.В. Кислов, Л.И. Худякова, А.Г. Николаев

Влияние способа учета абсолютных источников тепла на точность прогноза температуры
в подземных сооружениях криолитозоны..... 207

А.Ф. Галкин, В.Ю. Панков

ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Обогащение каолиновой руды месторождения Тамазерт (Алжир)
методом пенной флотации..... 215

М. Лараба

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Формирование противозерозионного растительного покрова на песчаном карьере
в условиях Арктики с помощью осадка сточных вод..... 223

А.В. Лусис, Л.А. Иванова, Т.Т. Горбачева, А.В. Румянцева

ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Внутренний и перекрестный сопоставительный анализ потребления электроэнергии
на угольных разрезах 232

С.А. Топно, Б.С. Умре, М.В. Аваре, Л.К. Саху

Моделирование защиты от несимметричных режимов работы
высоковольтного асинхронного привода циркуляционного компрессора
в установке гидроочистки топлив 245

В.В. Дмитриева, А.Б. Хамматов



CONTENTS

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Apo-dolomite nephrite processing wastes and their application 195

E. V. Kislov, L. I. Khudyakova, A. G. Nikolaev

Absolute heat sources as a method to check the accuracy of temperature prediction
in underground structures within cryolithozone..... 207

A. F. Galkin, V. Yu. Pankov

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Enrichment of Algerian kaolin using froth flotation method 215

M. Laraba

SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Establishment of an erosion-control plant cover in a sand pit under Arctic conditions
using sewage sludge 223

A. V. Lysis, L. A. Ivanova, T. T. Gorbachyova, A. V. Rumyantseva

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Internal and cross sectional benchmarking of electrical energy use in opencast coal mine..... 232

S. A. Topno, B. S. Umre, M. V. Aware, L. K. Sahoo

Simulation of protection against unbalanced high-voltage asynchronous drive
of recycle compressor in fuel hydrotreating unit..... 245

V. V. Dmitrieva, A. B. Khammatov



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-75>

УДК 691.21:553.89

**Отходы переработки аподоломитового нефрита
и направление их использования****Е. В. Кислов¹ , Л. И. Худякова² , А. Г. Николаев³ **¹ Геологический институт им. Н. Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН),
г. Улан-Удэ, Российская Федерация² Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук (БИП СО РАН),
г. Улан-Удэ, Российская Федерация³ Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ), г. Казань, Российская Федерация evg-kislov@ya.ru**Аннотация**

Камнесамоцветное сырье пользуется повышенным спросом, что приводит к возрастающему объему перерабатываемой горной массы. Обогащение исходного сырья, изготовление камнерезных и ювелирных изделий сопровождаются образованием большого количества отходов. Представленное исследование направлено на изучение вещественного состава и физико-механических свойств твердых отходов переработки аподоломитового нефрита Витимского региона. Образование отходов в значительном количестве приводит к затратам на перевозку, хранение и охрану, ухудшает экологическую обстановку. Месторождения аподоломитового нефрита находятся в Витимском регионе России. Наибольшее их количество сосредоточено на Северо-Западе, Северо-Востоке и Юге Китая, в меньшей мере – в Южной Корее, Австралии, Италии и Польше. В работе использованы отходы переработки наиболее продуктивного российского месторождения аподоломитового нефрита – Кавоктинского. Проведено визуальное и петрографическое изучение нефрита, скарна и амфиболита твердых отходов. Изучен макро- и микрохимический состав нефрита различного цвета, выполнен рентгенофазовый анализ. Определены декоративные свойства. Получен радиационно-гигиенический сертификат. Отходы имеют марки по дробимости 1200, по истираемости – И1, по морозостойкости – F400. Проведенные исследования показали, что в их составе не содержатся зерна слабых пород, а также глина, пылевидные и глинистые частицы. Твердые отходы переработки нефрита Витимского региона имеют высокое качество, соответствуют требованиям ГОСТ 8267–93, за исключением повышенного содержания фрагментов лещадных (уплощенных) и повышенного размера. Они могут использоваться в производстве обычного, декоративного и мозаичного бетонов, декоративных плит, внутренней отделки помещений, бань и саун, для изготовления сувенирной продукции. Использование в качестве сырья для каменного литья и пролонгированного удобрения требует дополнительного рассмотрения. Все это позволит не только решить проблему утилизации отходов, но и улучшить экономические показатели добычи минерального сырья.

Ключевые слова

нефрит, обогащение, отходы переработки, Витимский регион, минеральный состав, химический состав, декоративные свойства, физико-механические свойства, утилизация

Благодарности

Замечания рецензента редколлегии позволили значительно улучшить рукопись статьи. Авторы признательны ООО «Ориентал Вэй» за предоставление каменного материала, ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН, Улан-Удэ, и «Геоаналитик» ИГТ УрО РАН, Екатеринбург, за проведенные анализы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20003, <https://rscf.ru/project/22-27-20003>.

Для цитирования

Kislov E. V., Khudyakova L. I., Nikolaev A. G. Dolomite type nephrite processing wastes and their application. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):195–206. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-75>



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Dolomite type nephrite processing wastes and their application

E. B. Kislov¹ , L. I. Khudyakova² , A. G. Nikolaev³ ¹ *Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (GIN SB RAS), Ulan-Ude, Russian Federation*² *Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (BIP SB RAS), Ulan-Ude, Russian Federation*³ *Kazan (Privolzhsky) Federal University (KFU), Kazan, Russian Federation* evg-kislov@ya.ru**Abstract**

The demand for ornamental stone material has led to an increase in the amount of rock mass being processed. However, the production of lapidary works and jewelry result in a significant amount of waste. This study aims to investigate the material composition and physical and mechanical properties of the solid wastes generated during the processing of dolomite type nephrite in the Vitim region. The accumulation of such waste leads to increased costs of transportation, storage, security, and negative environmental impact. The majority of dolomite type nephrite deposits are located in the Northwest, Northeast, and South of China, in South Korea, Australia, Italy, and Poland, with a large deposit in the Vitim region of Russia. In this study, the waste from the Kavoktinsky deposit, the most productive in Russian, was used. A visual and petrographic examination of nephrite, skarn and amphibolite which are components of the solid waste, was conducted. The macro- and microchemical composition of nephrite of different colors was studied, and X-ray phase analysis was performed. The decorative properties of the waste were determined. A radiation and hygienic certificate was obtained. The waste has a crushability grade of 1200, abrasion grade of I1, and frost resistance of F400. The study has shown that the waste does not contain grains of incompetent rocks, clay, dust, and clay particles. The solid waste form the Vitim nephrite processing is of high quality and meets the requirements of GOST 8267-93, except for an increased content of flagstone (flattened) and large size fragments. It can be used for the production of ordinary, decorative, and mosaic concrete, decorative plates, interior decoration of premises, bathrooms, and saunas, and the manufacture of souvenir products. However, further research is needed to investigate the application of the waste as a raw material for stone casting and a slow-release fertilizer. The utilization of this waste not only solves the problem of waste disposal but also improves economic performance of mineral extraction.

Keywords

nephrite, processing, processing waste, the Vitim region, mineral composition, chemical composition, decorative properties, physical and mechanical properties, utilization

Acknowledgments

The manuscript has been greatly improved thanks to remarks made by the reviewer of the editorial board. The authors would like to express their gratitude to Oriental Way Ltd. for providing stone material, to the Geospectr Center (TsKP) of the Institute of Geology of SB RAS, Ulan-Ude, and to the Geoanalitik of the Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Yekaterinburg, for the analyses performed. The research was supported by grant No. 22-27-20003 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/22-27-20003>.

For citation

Kislov E. B., Khudyakova L. I., Nikolaev A. G. Dolomite type nephrite processing wastes and their application. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):195–206. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-75>

Введение

Камнесамоцветное сырье пользуется повышенным спросом, что приводит к возрастающему объему перерабатываемой горной массы. Обогащение исходного сырья, изготовление камнерезных и ювелирных изделий сопровождаются образованием большого количества отходов, представленных двумя видами. Это твердые обломки и обрезки вмещающих пород и некондиционного нефрита, полученные в результате получения сортового камня и изготов-

ления изделий, а также шламы, образованные при резке и обработке, – смесь воды, абразивного материала и мелких частиц камня. Объем их составляет 10–35 % исходного сырья. Постоянно увеличивающийся объем отходов приводит к возрастающим затратам на их перевозку, хранение и охрану от расхищения. Отходы оказывают негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [1–4]. Поэтому необходима утилизация таких отходов с получением товарной продукции.

Шлам используют в основном для производства цемента, бетонов и керамики, улучшая их показатели. В состав цемента вводится гранитный [5], мраморный [6–8] шлам. Он заменяет природный песок в составе цементных растворов [9]. Вводят шлам в состав глиняной массы для производства керамических материалов [10–13]. Отходы переработки мрамора, преимущественно твердые, используются для получения извести [14]. Отходы гранита используют для стабилизации рыхлых грунтов [15], а мраморную пыль – глинистых [16]. Обломки и обрезки используются в производстве искусственного декоративного камня для укладки пешеходных тротуаров [17], полов жилых и промышленных зданий [18].

Все вышеперечисленные примеры касаются отходов переработки гранита и мрамора. Единичные работы посвящены возможности использования некондиционного апосерпентинитового нефрита [19, 20]. Отходы переработки аподоломитового нефрита до сих пор не рассматривались, несмотря на интенсивное его использование.

По состоянию на 01.01.2022 Государственным балансом запасов в России учитываются 26 месторождений нефрита. В 2021 г. разрабатывалось 7 месторождений в Бурятии, включая Кавоктинское, Нижне-Олломинское, Сергеевскую залежь, Хайтинское аподоломитового нефрита. Из других месторождений аподоломитового нефрита Воймаканское в Бурятии подготавливалось к отработке, Удоканское в Забайкальском крае и Буромское в Бурятии разведывались. В нераспределенном фонде месторождений аподоломитового нефрита нет. Все они находятся в Витимском нефритомоносном районе. Наиболее крупное Кавоктинское – на 01.01.2022 запасы по С2 346,81 т, добыто в 2021 г. 70,36 т нефрита, или 28,58 % добычи России.

За рубежом большинство месторождений аподоломитового нефрита находятся в Китае. Наиболее крупные известные месторождения в Северо-Западном Китае. В Синцзян-Уйгурском автономном районе находится отрабатываемый уже 6 тысячелетий нефритомоносный пояс Хотан как с коренными месторождениями [21–23], среди которых наиболее известен и изучен Аламас [24, 25], так и знаменитыми россыпными месторождения Юрункаш – «река белого нефрита» и Каракаш – «река черного нефрита» [26–28]. К поясу Хотан с востока примыкают нефритомоносные районы Алтынтаг [29, 30] и Южный Алтынтаг [31–32]. Еще восточнее находятся Голмуд и другие месторождения провинции Цинхай [33, 34]. Ряд месторождений находится в Северо-Восточном Китае: Тели в провинции Хэйлуцзян [35–37], Паньши в провинции Гиринь [38], Сюань и Санпийю в провинции Ляонин [39, 40]. В Восточном Китае известно месторождение Сяомэйлин в провинции Цзянсу [41, 42]. В Южном Центральном Китае находятся месторождения Луаньчуань в провинции Хэнань [43, 44] и Дахуа в Гуанси-Джуанском автономном районе [45–47]. В Южном Западном Китае – месторождения Лунси в провинции Сычуань [48] и Лодянь в провинции Гуйжоу [49].

В других странах следует отметить месторождение Чунчон в Южной Корее [50, 51], район Коуэлл на полуострове Эйр в Южной Австралии [52, 53], месторождение Альпе Мастабия (Вал Маленко) в Ломбардии, Италия [54], месторождение Злоты Сток в Нижней Силезии, Польша [55–57].

Цель данной работы – изучение физико-механических характеристик твердых отходов переработки аподоломитового нефрита и определение направлений их использования.

Материалы и методы

Объект исследований – твердые отходы, образованные в процессе обогащения аподоломитового нефрита Витимского региона. Отходы обогащения нефрита Кавоктинского месторождения предоставлены ООО «Ориентал Вэй».

Отбор образцов для лабораторного исследования проводился точечным методом. По разложенным на горизонтальной поверхности частям партии намечалась квадратная сетка. Из середины клеток сетки отбирались навески образцов. Для максимальной представительности всех разновидностей отходов переработки нефрита из партии выбрано 20 навесок образцов общим весом 200 кг для дальнейшего лабораторного исследования. Представительные образцы отобраны для детального вещественного исследования (рис. 1).

Отходы переработки нефрита исследовались на соответствие требованиям ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» и ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний».

Методика включала в себя минералого-петрографическое исследование, выполнение химического анализа, определение декоративных свойств, проведение физико-механических испытаний отходов и сравнение полученных данных с требуемыми показателями ГОСТа.



Рис. 1. Отходы переработки нефрита



Были проведены визуальное петрографическое и минералогическое определение твердых отходов с отбором представительных образцов, измерение размеров и описание формы при помощи мерной ленты; взвешивание портативными электронными весами, определение излома, твердости по шкале Мооса, выявление трещиноватости, диагностика карбонатных минералов 5%-ным раствором соляной кислоты, петрографическое изучение шлифов под поляризационным микроскопом ПОЛАМ Л-213 в ГИН СО РАН, Улан-Удэ.

Силикатный анализ выполнен в ЦКП «Геоспектр» ГИН СО РАН, Улан-Удэ, на спектрофотометре UNICO 1201 (United Products and Instruments, США), работающем в спектральном интервале 315–1000 нм; атомно-абсорбционном спектрофотометре SOLAAR-6M («Unicam», Англия) с соответствующим программным обеспечением. Также использовались атомно-абсорбционный, пламенно-фотометрический, гравиметрический и титриметрический методы, весы электронные ВСЛ-200/0,1А (ЗАО «БЕС-СЕРВИС», Санкт-Петербург, Россия) с диапазоном взвешивания от 0,01 до 205 г.

Содержания рассеянных элементов определены на масс-спектрометрической системе высокого разрешения HR ICP-MS ELEMENT2 (ThermoFinnigan) для мультиэлементного анализа геологического материала в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, Екатеринбург. Контроль качества получаемых результатов осуществлялся путем параллельных анализов внутренних сверочных проб и стандартных образцов горных пород (образцы СГ-1А, СГД-1А, BCR-2). В течение анализа серии проб измерение стандартного образца – BCR2 (U.S. Geological Survey) – проводилось с периодичностью 1:5–1:10.

Оптические свойства – прозрачность, цвет, оптические эффекты, включения, изучались с помощью бинокулы МБС-10 и 20-кратной геммологической лупы 20-кратного увеличения в КФУ, Казань. При определении цвета, оттенков, тона и насыщенности использовались шкала цвета по системе GIA и требования ТУ 117-3-0761-7-00 для определения тона и насыщенности цвета образцов. Исследования проводились методом оптической абсорбционной спектроскопии. Оптические спектры поглощения записывались на стандартизированном спектрофотометре МСФУ-К. Регистрация оптических спектров поглощения производилась в интервале длин волн 400–800 нм с шагом 1 нм. Для объективного измерения и описания окраски образцов была использована методика расчета координат цветности по международной колориметрической системе XYZ. Все колориметрические результаты по интерпретации оптических спектров поглощения минералов были вынесены на стандартный цветовой треугольник международной комиссии по освещению (МКО-1931). Колориметрические параметры исследуемых минералов по международной системе CIE Lab рассчитывались с использованием специализированной программы «Спектр». Координаты цвета с помощью специальной таблицы переводились в системы GIA,

которые используются для оценки цвета. Все экспериментальные исследования проводились при комнатной температуре. С каждого образца снималось по 5 спектров.

Физико-механические свойства определялись в БИП СО РАН, Улан-Удэ, в соответствии с требованиями ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» и ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний». Из отходов выбирали фракцию 40–70 мм для определения зернового состава. Фракцию более 70 мм дробили на щековой дробилке. Доведение проб отходов до постоянной массы, определение влажности осуществлялись в шкафу сушильном ШСУ-М1 (ОАО «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия) с температурой нагрева от 50 до 300 °С и скоростью нагрева до максимальной температуры не более 120 мин. При выполнении гранулометрического анализа использовался стандартный набор сит. Взвешивание осуществлялось на весах электронных МК-15.2-A22/10540 (ЗАО «Мас-са-К», Санкт-Петербург, Россия). Рентгенофазовый анализ проводился на порошковом автоматическом дифрактометре D8 Advance фирмы BrukerAXS (Germany) с соответствующим программным обеспечением со скоростью угломера 2° в минуту в интервале от 5 до 70°. При проведении механических испытаний использовался испытательный гидравлический пресс ПГМ-500 (ООО «СКБ Стройприбор», Челябинск, Россия) с диапазоном нагрузок до 50 т и скоростью перемещения плиты 10 ± 1 мм мин⁻¹. При определении истираемости использовался барабан полочный КП 123 (ООО «Новое дело», Санкт-Петербург, Россия) диаметром 700, длиной 500 мм, снабженный на внутренней поверхности полкой шириной 100 мм.

Радиационно-гигиеническая оценка выполнена в соответствии с требованиями ГОСТ 30108–2016 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов». Измерение эффективной удельной активности природных радионуклидов отходов переработки нефрита проведено в Испытательном лабораторном центре Федерального бюджетного учреждения здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Бурятия» на комплексе универсальном спектрометрическом УСК «Гамма-плюс».

Результаты

Партия твердых отходов представлена угловатыми изометричными до уплощенных обломками, обрезами неправильной формы светло-окрашенного нефрита-сырца. Размер 75 % блоков – от 4 до 12 см по наибольшему измерению, 25 % – от 12 до 15 см. Окраска камня однородная до неоднородной, иногда пятнистая, полосчатая, светло-салатная, серовато-белая, зачастую с голубоватым оттенком, светло-серая, темно-серая, бурая (медовая), редко местами светло-зе-



леная, зачастую с бурыми каемками прокрашивания по трещинам и поверхностям блока. Местами блоки содержат визуально различимые изометричные зерна тремолита, кальцита, эпидота, хлорита, черные и изумрудно-зеленые вкрапления, дендриты черных гидроксидов марганца и хлопьеобразные агрегаты бурых гидроксидов железа; покрыты белыми матовыми корочками с дендритами черных гидроксидов марганца; по трещинам также отмечаются дендриты черного гидроксида марганца, белые пленки кальцита и бурые – гидроксидов железа. Ряд блоков содержат участки белых матовых тремолит-кальцитовых скарнов, разнообразных по окраске метасоматизированных амфиболитов. Некоторые блоки полностью сложены скарнами и амфиболитами.

При увеличении бинокулярного микроскопа в нефрите отмечаются включения отдельных кристаллов и агрегатов кальцита и широкопризматического тремолита, дендриты гидроксидов марганца, хлопьевидные агрегаты гидроксидов железа, прожилки кальцит-тремолитового скарна. На свежих сколах обнаруживаются неровные, занозистые, раковистые изломы.

Структура нефрита под петрографическим микроскопом – практически мономинеральный агрегат кристаллов и тончайших волокон преимущественно тремолитового амфибола с характерной для нефритов спутанно-волокнистой (фибробластовой) структурой, с размером отдельных волокон от нескольких микрон до $0,1 \times 0,5$ мм. Форма агрегатов в основном параллельно-волокнистая, веерообразная и войлокоподобная. Участками в нефрите наблюдаются включения отдельных кристаллов и агрегатов кальцита, широкопризматического тремолита изометричной или вытянутой формы с размером зерен до 1–10 мм. Нефрит принимает неоднородную полировку, местами отмечается значительная шагрень. Участки нефрита с включениями других минералов и их агрегатных скоплений не принимают полировки, матовые, шероховатые. Просвечиваемость по краю штуфа на глубину до 5 см.

В скарне тремолит представлен несколькими разновидностями: плотный фарфоровидный, состоящий из мельчайших, бесформенных лучистых агрегатов с просечками, расплывчатыми агрегатами тонкодисперсного кальцита, следами призматиче-

ских кристаллов тремолита; крупные бесформенные выделения с реликтами расщепленного призматического тремолита, замещенного тонковолокнистым тремолитом; мелкозернистый разноориентированный тремолит с величиной зёрен от $0,01 \times 0,03$ до $0,6 \times 1,3$ мм. Встречаются чечевицеобразные агрегаты тонкозернистого кальцита в различной пропорции с тремолитом. В другом случае многочисленные одиночные зерна, метельчатые, радиальнолучистые агрегаты тремолита с апатитом чередуются с нефритовидными участками, сложенными микро- и тонкозернистым тремолитом. Встречаются также диопсид, плагиоклаз.

Основной минерал амфиболита – тремолит до актинолита. Тремолит находится в крупных зёрнах кальцита в виде тонких длинных игольчатых призм, протыкающих минерал-хозяин параллельно друг другу, беспорядочных сростаний с неровными, извилистыми поверхностями. Разнозернистый актинолит образует агрегаты с редким кальцитом, сростками призматического эпидота, иногда слагающего радиально-лучистые сростания, калиевый полевой шпат образует редкие небольшие угловатые интерстиции. Зерна кальцита содержат включения доломита, эпидота, хлорита, кварца до 30 % площади минерала-хозяина, зерна цоизита и тонко-линоватого хлорита, образующего также причудливые, иногда обширные пятнообразные агрегаты среди зёрен кальцита. Ксеноморфные зёрна кварца насыщены ромбическими, игольчатыми кристаллами тремолита и/или эпидота, занимающими до 25 % площади минерала-хозяина. В некоторых случаях преобладает плагиоклаз, по которому развиваются зернистые агрегаты эпидота и клиноцоизита, иногда образующих самостоятельные интерстициальные агрегаты, в том числе с калиевым полевым шпатом. Встречаются также апатит, сфен и циркон.

Содержание макро- и микрокомпонентов в нефрите разной цветовой гаммы из твердых отходов представлено в табл. 1 и 2.

Минеральный состав твердых отходов подтверждается результатами рентгенофазового анализа (рис. 2).

На рентгенограмме основные рефлексы принадлежат минералам: тремолиту, диопсиду, хлориту, тальку и кальциту.

Таблица 1

Химический состав нефрита

Проба	Содержание																
	%														г/т		
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	п.п.п	Сумма	F	Cr	Co	Ni
КС-6	58,2	<0,02	0,3	<0,1	0,20	0,04	25,77	12,50	0,08	0,06	<0,1	2,72	99,87	0	<5	6	9,5
КС-7	57,5	<0,02	0,6	<0,1	0,16	0,02	24,98	12,92	0,08	0,04	<0,1	2,9	99,2	0	<5	9,5	8
КС-8	56,8	<0,02	0,7	<0,1	0,22	0,03	25,36	13,15	0,10	0,07	<0,1	2,28	98,71	0,32	9	9,8	8

Примечание: здесь и далее – анализы нефрита – КС-6 – бурого, КС-7 – салатного, КС-8 – белого.



Таблица 2

Содержание рассеянных элементов в нефрите, г/т

Элемент	КС-6	КС-7	КС-8	Элемент	КС-6	КС-7	КС-8
Li	4	7	6	Te	< 0,01	< 0,01	0,026
Be	11	17	9	Cs	1,8	2,1	0,7
Sc	1	1	0,6	Ba	6	5	8
Ti	50	80	18	La	0,2	0,4	0,35
V	8	17	8	Ce	0,47	0,8	0,59
Cr	2,4	4,7	15	Pr	0,06	0,1	0,07
Mn	180	80	140	Nd	0,25	0,41	0,3
Co	4	6	5	Sm	0,06	0,09	0,07
Ni	11	6	9	Eu	0,01	0,02	0,018
Cu	4,1	6	50	Gd	0,065	0,094	0,069
Zn	14	20	14	Tb	0,01	0,014	0,01
Ga	0,8	2,4	0,9	Dy	0,07	0,09	0,06
Ge	0,5	0,5	0,6	Ho	0,015	0,02	0,012
As	90	86	80	Er	0,043	0,058	0,033
Se	0,2	0,17	0,15	Tm	0,006	0,009	0,0036
Rb	2,4	2,9	2,3	Yb	0,04	0,05	0,02
Sr	70	60	60	Lu	0,006	0,008	0,0028
Y	0,4	0,6	0,5	Hf	0,041	0,06	0,06
Zr	2,1	2,7	2,8	Ta	0,019	0,06	< 0,001
Nb	0,06	0,37	0,12	W	16	30	40
Mo	0,22	0,16	0,6	Tl	0,013	0,012	0,005
Ag	< 0,0004	0,027	0,079	Pb	4	8	12
Cd	0,05	0,05	0,09	Bi	< 0,0005	0,057	0,065
Sn	0,11	0,2	0,28	Th	0,008	0,14	0,03
Sb	0,08	0,18	0,24	U	0,026	0,6	0,047

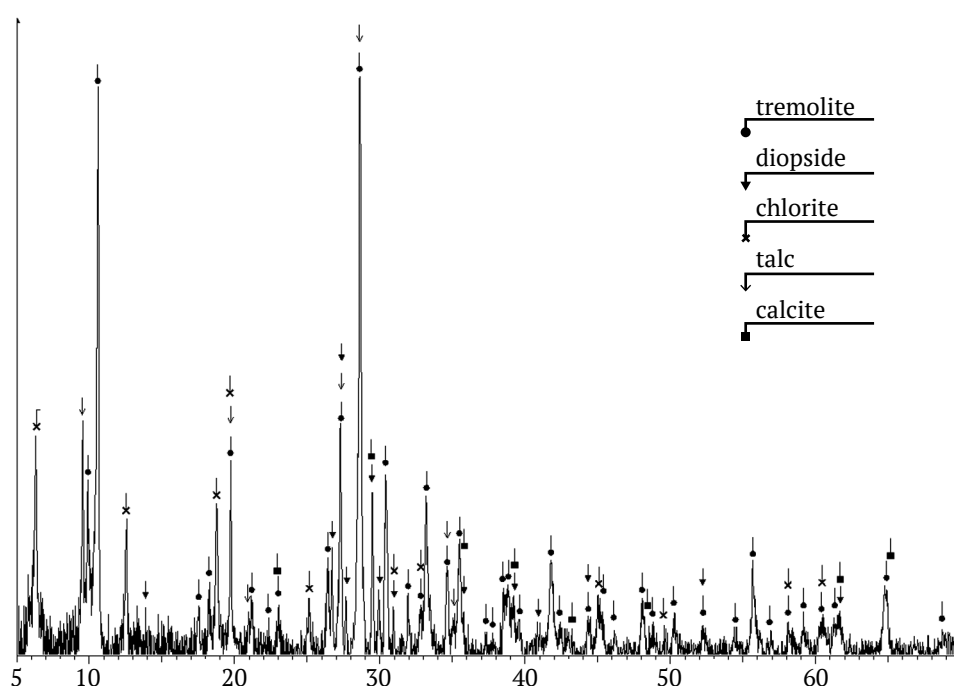


Рис. 2. Рентгенограмма отходов переработки нефрита

При визуальном описании выделены следующие цветовые характеристики: основной цвет, оттенок, тон, насыщенность с двумя основными разновидностями. Белый от чисто белого до слабо насыщенного сероватого или желтовато-коричневатого, при окислении железа до коричневого (медового) – пример на рис. 3. Салатный (зеленоватый) от голубовато- до желто-зеленоватого, при окислении железа до коричневого (медового) – пример на рис. 4.

Таким образом, основные цветовые виды – белый, встречаются серый с бледно-зеленым оттенком, яркие светло-синевато-зеленые и синевато-зеленые тона. Характеристика рисунка – однородный, коричневые каемки прокрашивания. Редко включения призматического тремолита, реже кальцита и диопсида белого цвета, заметные благодаря спайности.

Общая особенность оптических спектров поглощения нефритов – наличие широкой полосы поглощения в ближней инфракрасной области в райо-

не 990 нм (рис. 5). При исследовании конфигурации данной линии и результатов химических анализов нефритов было выявлено, что данная полоса связана со спин-разрешенными переходами $^5T_2(^5D) \rightarrow ^5E(^5D)$ в ионах Fe^{2+} в позициях M1, M2, M3, которые замещают Mg^{2+} . Полосы поглощения в районе 440 нм и 650 нм в спектре изучаемого нефрита обусловлены разрешенными по спину переходами из основного состояния $^4A_{2g}(^4F)$ на более высокие энергетические уровни – $^4T_{1g}(^4F)$ и $^4T_{2g}(^4F)$ соответственно [58, 57].

Удельная эффективная активность природных радионуклидов отходов переработки нефрита составила менее 50 Бк/кг.

Поскольку отходы представляют собой остатки от распиловки размером более 40 мм, в качестве щебня можно использовать только фракцию 40–70 мм, остальную часть необходимо подвергнуть дроблению. Фракционный состав дробленых отходов представлен на рис. 6.

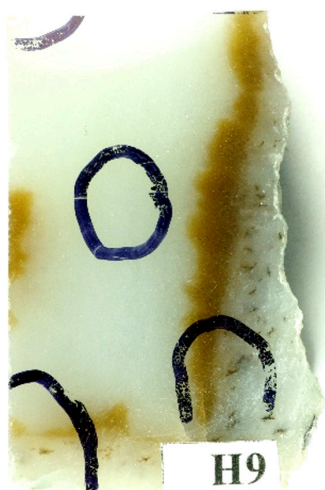


Рис. 3. Нефрит Н9 белый w с коричневыми каемками br и корочкой выветривания с черными гидроксидами марганца



Рис. 4. Нефрит Н11 синевато-зеленый bG светлый l, умеренно сильная насыщенность света mst, корочка прокрашивания коричневая Brn (от светлой l до чрезвычайно темной exdk с сильной насыщенностью света st)

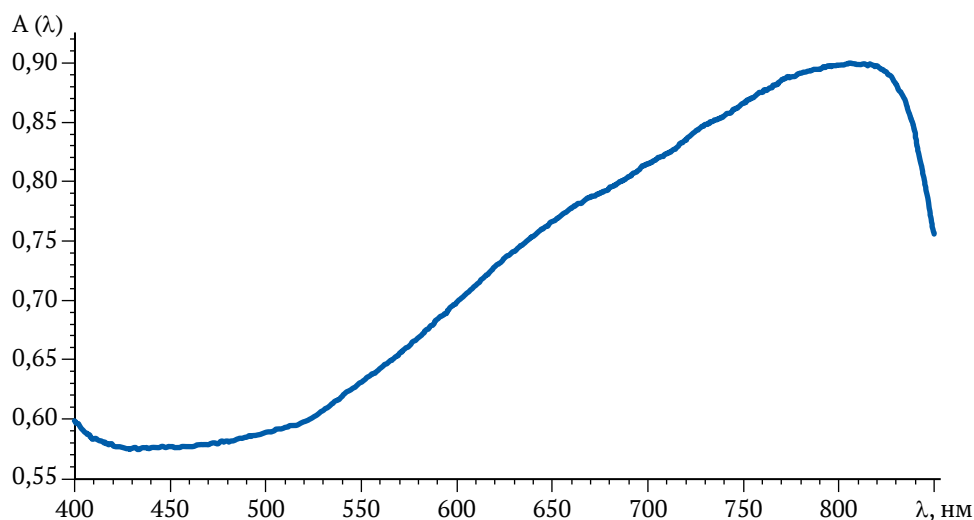


Рис. 5. Оптический спектр белого нефрита Н9. Lab 55,0938: -5,4096: -5,7374 (CIE Lab)

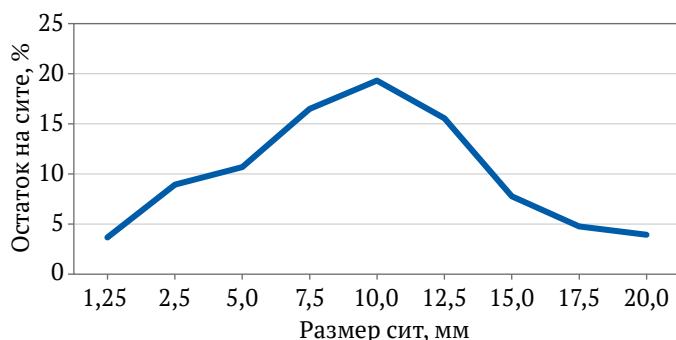


Рис. 6. Распределение щебня по размерам сит

Как показывают полученные данные, наибольшее количество дробленых отходов (62 %) имеет размеры от 5 до 15 мм, фракция менее 5 мм составляет 21,5 %.

Обладая спутанно-волокнуистой микроструктурой и высокой вязкостью, нефрит очень тяжело дробится. В результате наблюдается высокий процент зерен игловатой и лещадной форм. Данный показатель составляет 23,4 %, что относит щебень из отходов переработки нефрита к третьей группе щебня согласно ГОСТ 8267–93.

Отходы имеют марки по дробимости 1200, по истираемости – И1, по морозостойкости – F400. Проведенные исследования показали, что в их составе не содержатся зерна слабых пород, а также глина, пылевидные и глинистые частицы. Результаты исследований и соответствие твердых отходов переработки нефрита Витимского региона требованиям ГОСТ 8267–93 сведены в табл. 3.

Обсуждение

В результате изучения вещественного состава твердых отходов переработки нефрита Витимского региона вредных компонентов и примесей – минералов, химических макро- и микрокомпонентов не обнаружено. Декоративные свойства (окраска, рисунок, просвечиваемость, принятие полировки, дефекты) соответствуют существующим стандартам.

Удельная эффективная активность природных радионуклидов отходов переработки нефрита менее 50 Бк/кг, что соответствует нормам НРБ-99/2009, ГОСТ 8267–93 и 1-му классу безопасности. Это позволяет использовать их для всех видов строительных работ в качестве поделочного и облицовочного камня.

Отходы имеют марки по дробимости 1200, по истираемости – И1, по морозостойкости – F400. Проведенные исследования показали, что в их составе не содержатся зерна слабых пород, а также глина, пылевидные и глинистые частицы. Твердые отходы переработки нефрита Витимского региона имеют высокое качество, соответствуют требованиям ГОСТ 8267–93, за исключением повышенного содержания фрагментов лещадных (уплощенных) и повышенного размера. Их реализация как щебня возможна по соглашению сторон.

Отходы переработки нефрита имеют высокое качество и после дробления могут использоваться в качестве щебня для проведения строительных работ. Наряду с изготовлением обычного бетона можно получать декоративный и мозаичный бетоны для отделки и облицовки стен и полов. Возможно получение декоративных плит для пола на основе цементных и полимерных вяжущих композиций. Это обусловлено соответствием отходов требованиям ГОСТ 9479–2011 «Блоки из

Таблица 3

Физико-механические показатели отходов переработки нефрита

№ п/п	Показатель	Отходы переработки нефрита	Требования ГОСТ 8267–93
1	Полные остатки на контрольных ситах, % по массе	98,73	d от 90 до 100
		48,34	0,5(d+D) от 30 до 60
		6,10	D до 10
		0,32	1,25D до 0,5
2	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, % по массе	36,6	–
3	Марка по дробимости	1200	–
4	Марка по истираемости	И1	–
5	Содержание зерен слабых пород, % по массе	0	Менее 5
6	Морозостойкость	F400	–
7	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	0	Менее 1
8	Содержание глины в комках, % по массе	0	Менее 0,25
9	Наличие вредных компонентов и примесей	нет	–
10	Устойчивость против всех видов распада (потеря массы при распаде, %)	0	Менее 3
11	Истинная плотность, г/см ³	2,8426	–
12	Средняя плотность, г/см ³	2,8995	–
13	Насыпная плотность, кг/м ³	1314,29	–
14	Влажность, %	0,083	–
15	Водопоглощение, %	0,1937	–



горных пород для производства облицовочных, архитектурно-строительных, мемориальных и других изделий» и ГОСТ 24099–2013 «Плиты декоративные на основе природного камня. Технические условия».

Кроме того, отходы переработки нефрита можно использовать как облицовочный материал для внутренней отделки помещений (прихожих, ванн). Поскольку они имеют высокую плотность (2900 кг/м³), прочность (M1200), низкое водопоглощение (0,2 %), устойчивы к воздействию агрессивных сред, перепадам температур, имеют температуру плавления порядка 1250 °C и низкую теплопроводность, они пригодны для облицовки бань и саун.

Отходы переработки нефрита – ценный материал для изготовления сувенирной продукции. Отходы могут быть использованы в качестве сырья для каменного литья и пролонгированного удобрения, особенно для территорий с недостатком кальция и магния из-за преобладающего развития гранитов, таких как Бурятия.

Заключение

Отходы переработки нефрита имеют высокое качество, за небольшим исключением соответствующим требованиям российских стандартов. Они могут использоваться в производстве щебня, в том числе для производства обычного, декоративного и мозаичного бетонов. В составе цементных и полимерных вяжущих композиций они пригодны для получения декоративных плит. В качестве самостоятельного материала могут применяться для внутренней отделки помещений. Также это ценное сырье для изготовления сувенирной продукции. Они могут использоваться в качестве сырья для каменного литья и пролонгированного удобрения, особенно для территорий с недостатком кальция и магния из-за преобладающего развития гранитов, таких как Бурятия. Все это позволит не только решить проблему утилизации отходов, но и улучшить экономические показатели добычи минерального сырья.

Список литературы / References

1. Emmanuel A.Y., Jerry C.S., Dzigbodi D.A. Review of environmental and health impacts of mining in Ghana. *Journal of Health and Pollution*. 2018;8(17):43–52. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-8.17.43>
2. Jain M. K., Das A. Impact of mine waste leachates on aquatic environment: A review. *Current Pollution Reports*. 2017;3(1):31–37. <https://doi.org/10.1007/s40726-017-0050-z>
3. Wellen C., Shatilla N.J., Carey S.K. The influence of mining on hydrology and solute transport in the Elk Valley, British Columbia, Canada. *Environmental Research Letters*. 2018;13(7):074012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaca9d>
4. Strzałkowski P. Characteristics of waste generated in dimension stone processing. *Energies*. 2021;14(21):7232. <https://doi.org/10.3390/en14217232>
5. Medina G., Sáez del Bosque I.F., Frías M., et al. Mineralogical study of granite waste in a pozzolan/Ca(OH)₂ system: Influence of the activation process. *Applied Clay Science*. 2017;135:362–371. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.018>
6. Prošek Z., Nezerka V., Tesárek P. Enhancing cementitious pastes with waste marble sludge. *Construction and Building Materials*. 2020;255:119372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119372>
7. Wang T., Yang W., Zhang J. Experimental studies on mechanical properties and microscopic mechanism of marble waste powder cement cementitious materials. *Crystals*. 2022;12(6):868. <https://doi.org/10.3390/cryst12060868>
8. Ahmed A., Abbas S., Abbas W., et al. Potential of waste marble sludge for repressing alkali-silica reaction in concrete with reactive aggregates. *Materials*. 2022;15(11):3962. <https://doi.org/10.3390/ma15113962>
9. Moreira P.I., de Oliveira Dias J., de Castro Xavier G., et al. Ornamental stone processing waste incorporated in the production of mortars: Technological influence and environmental performance analysis. *Sustainability*. 2022;14(10):5904. <https://doi.org/10.3390/su14105904>
10. Gadioli M.C.B., Ponciano V.M., Bessa B.H.R., et al. Characterization of ornamental stones wastes for use in ceramic materials. *Materials Science Forum*. 2019;958:129–134. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.958.129>
11. Xavier G.C., Azevedo A.R.G., Alexandre J., et al. Determination of useful life of red ceramic parts incorporated with ornamental stone waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2019;31(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002590](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002590)
12. Munir M.J., Kazmi S.M.S., Wu Y.-F., et al. Thermally efficient fired clay bricks incorporating waste marble sludge: An industrial-scale study. *Journal of Cleaner Production*. 2018;174:1122–1135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.060>
13. Ahmad S., Shah M.U.H., Ullah A., et al. Sustainable use of marble waste in industrial production of fired clay bricks and its employment for treatment of flue gases. *ACS Omega*. 2021;6:22559–22569. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02279>
14. Soltan A.M., Taman Z., El-Kaliouby B. Recycling of ornamental stones hazardous wastes. *Natural Resources*. 2011;2(4):244–249. <https://doi.org/10.4236/nr.2011.24031>
15. Abdelkader H.A.M., Ahmed A.S.A., Hussein M.M.A., et al. An experimental study on geotechnical properties and micro-structure of expansive soil stabilized with waste granite dust. *Sustainability*. 2022;14(10):6218. <https://doi.org/10.3390/su14106218>



16. Ibrahim H.H., Alshkane Y.M., Mawlood Y.I., et al. Improving the geotechnical properties of high expansive clay using limestone powder. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2020;5(3):112. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00366-z>
17. Carvalho E.A.S., Vilela N.F., Monteiro S.N., et al. Novel artificial ornamental stone developed with quarry waste in epoxy composite. *Materials Research*. 2018;21(1):e20171104. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1104>
18. Silva F.S., Ribeiro C.E.G., Rodriguez R.J.S. Physical and mechanical characterization of artificial stone with marble calcite waste and epoxy resin. *Materials Research*. 2018;21(1). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0377>
19. Худякова Л.И., Кислов Е.В., Палеев П.Л., Малышев А.В. Комплексное использование некондиционного нефрита. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(8):68–76. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/8/2769>
- Khudyakova L.I., Kislov E.V., Paleev P.L., Malyshev A.V. Comprehensive use of substandard nephrite. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(8):68–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/8/2769>
20. Khudyakova L.I., Kislov E.V., Paleev P.L., Kotova I.Yu. Nephrite-bearing mining waste as a promising mineral additive in the production of new cement types. *Minerals*. 2020;10(5):394. <https://doi.org/10.3390/min10050394>
21. Liu Y., Zhang R., Zhang Zh., et al. Mineral inclusions and SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Alamas nephrite and granodiorite: Implications for the genesis of a magnesian skarn deposit. *Lithos*. 2015;212–215:128–144. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.11.002>
22. Zhang X., Shi G., Zhang X., Gao G. Formation of the nephrite deposit with five mineral assemblage zones in the Central Western Kunlun Mountains, China. *Journal of Petrology*. 2022;63(11):egac117. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac117>
23. Nangeelil K., Dimpfl P., Mamtimin M., et al. Preliminary study on forgery identification of Hetian Jade with Instrumental Neutron Activation Analysis. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023;191:110535. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110535>
24. Liu Y., Deng J., Shi G.H., et al. Chemical Zone of Nephrite in Alamas, Xinjiang, China. *Resource Geology*. 2010;60(3):249–259. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00135.x>
25. Liu Y., Deng J., Shi G., et al. Geochemistry and petrology of nephrite from Alamas, Xinjiang, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011;42(3):440–451. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.05.012>
26. Jing Y., Liu Y. Genesis and mineralogical studies of zircons in the Alamas, Yurungkash and Karakash Rivers nephrite deposits, Western Kunlun, Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews*. 2022;149:105087. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105087>
27. Liu Y., Deng J., Shi G., Sun X., Yang L. Geochemistry and petrogenesis of placer nephrite from Hetian, Xinjiang, Northwest China. *Ore Geology Reviews*. 2011;41(1):122–132. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.07.004>
28. Liu Y., Zhang R.-Q., Maituohuti A., et al. SHRIMP U-Pb zircon ages, mineral compositions and geochemistry of placer nephrite in the Yurungkash and Karakash River deposits, West Kunlun, Xinjiang, northwest China: Implication for a Magnesium Skarn. *Ore Geology Reviews*. 2016;72(1):699–727. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.08.023>
29. Jiang Y., Shi G., Xu L., Li X. Mineralogy and geochemistry of nephrite jade from Yinggelike deposit, Altyn Tagh (Xinjiang, NW China). *Minerals*. 2020;10(5):418. <https://doi.org/10.3390/min10050418>
30. Liang H., Shi G., Yuan Y., et al. Polysynthetic twinning of diopsides in the Niewang and Tatliksu nephrite deposits, Xinjiang, China. *Minerals*. 2022;12(12):1575. <https://doi.org/10.3390/min12121575>
31. Gao K., Shi G., Wang M. et al. The Tashisayi nephrite deposit from South Altyn Tagh, Xinjiang, northwest China. *Geoscience Frontiers*. 2019;10(4):1597–1612. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.10.008>
32. Liu X., Gil G., Liu Y. Timing of formation and cause of coloration of brown nephrite from the Tiantai Deposit, South Altyn Tagh, northwestern China. *Ore Geology Reviews*. 2021;131:103972. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103972>
33. Yu H.Y., Wang R.C., Guo J.C., et al. Color-inducing elements and mechanisms in nephrites from Golmud, Qinghai, NW China: Insights from spectroscopic and compositional analyses. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2016;111(5):313–325. <https://doi.org/10.2465/jmps.151103>
34. Yu H.Y., Wang R.C., Guo J.C., et al. Study of the minerogenetic mechanism and origin of Qinghai nephrite from Golmud, Qinghai, Northwest China. *Science China Earth Sciences*. 2016;59:1597–1609. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-0231-8>
35. Gao S., Bai F., Heide G. Mineralogy, geochemistry and petrogenesis of nephrite from Tieli, China. *Ore Geology Reviews*. 2019;107:155–171. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.02.016>
36. Xu H., Bai F. Origin of the subduction-related Tieli nephrite deposit in Northeast China: Constraints from halogens, trace elements, and Sr isotopes in apatite group minerals. *Ore Geology Reviews*. 2022;142:104702. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104702>



37. Xu H., Bai F., Jiang D. Geochemical characteristics and composition changes of tremolite at various stages in the mineralization process of nephrite from Tieli, Heilongjiang, Northeastern China. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021;14:204. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06578-6>
38. Bai F., Li G., Lei J., Sun J. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of nephrite from Panshi, Jilin, Northeast China. *Ore Geology Reviews*. 2019;115:103171. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103171>
39. Zhang C., Yu X., Jiang T. Mineral association and graphite inclusions in nephrite jade from Liaoning, northeast China: Implications for metamorphic conditions and ore genesis. *Geoscience Frontiers*. 2019;10(2):425–437. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.02.009>
40. Zheng F., Liu Y., Zhang H.-Q. The petrogeochemistry and zircon U-Pb age of nephrite placer deposit in Xiuyan, Liaoning. *Rock and Mineral Analysis*. 2019;38(4):438–448. (In Chinese). <https://doi.org/10.15898/j.cnki.11-2131/td.201807310089>
41. Li P., Liao Z., Zhou Zh., Wu Q. Evidences from infrared and Raman spectra: Xiaomeiling is one reasonable provenance of nephrite materials used in Liangzhu Culture. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2021;261:120012. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.120012>
42. Li P., Liao Z., Zhou Zh. The residual geological information in Liangzhu jades: Implications for their provenance. *Proceedings of the Geologists' Association*. 2022;133(3):256–268. <https://doi.org/10.1016/j.pgeola.2022.04.003>
43. Chen D., Yang Y., Qiao B., et al. Integrated interpretation of pXRF data on ancient nephrite artifacts excavated from Tomb No. 1 in Yuehe Town, Henan Province, China. *Heritage Science*. 2022;10:1. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00642-w>
44. Ling X.-X., Schmädicke E., Li Q.-L., et al. Age determination of nephrite by in-situ SIMS U-Pb dating syngenetic titanite: A case study of the nephrite deposit from Luanchuan, Henan, China. *Lithos*. 2015;220–223:289–299. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.019>
45. Bai B., Du J., Li J., Jiang B. Mineralogy, geochemistry, and petrogenesis of green nephrite from Dahua, Guangxi, Southern China. *Ore Geology Reviews*. 2020;118:103362. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103362>
46. Yin Z., Jiang C., Santosh M., et al. Nephrite jade from Guangxi province, China. *Gems and Gemology*. 2014;50(3):228–235. <https://doi.org/10.5741/GEMS.50.3.228>
47. Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Zh. Black nephrite jade from Guangxi, Southern China. *Gems and Gemology*. 2019;55(2):198–215. <https://doi.org/10.5741/GEMS.55.2.198>
48. Wang W., Liao Z., Zhou Z., et al. Gemmological and mineralogical characteristics of nephrite from Longxi, Sichuan Province. *Journal of Gems & Gemmology*. 2022;24(1):20–27. (In Chinese). <https://doi.org/10.15964/j.cnki.027jgg.2022.01.003>
49. Wang L., Lin J.H., Ye T.P., et al. Discussing the coloration mechanism of Luodian Jade from Guizhou. *Open Access Library Journal*. 2020;7:e6364. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106364>
50. Feng Y., He X., Jing Y. A new model for the formation of nephrite deposits: A case study of the Chuncheon nephrite deposit, South Korea. *Ore Geology Reviews*. 2022;141:104655. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104655>
51. Yui T.-F., Kwon S.-T. Origin of a dolomite-related jade deposit at Chuncheon, Korea. *Economic Geology*. 2002;97(3):593–601. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.593>
52. Nichol D. Two contrasting nephrite jade types. *The Journal of Gemmology*. 2000;27(4):193–200.
53. Tan T.L., Ng N.N., Lim N.C. Studies on nephrite and jadeite jades by Fourier transform infrared (FTIR) and Raman spectroscopic techniques. *Cosmos*. 2013;9(1):47–56. <https://doi.org/10.1142/S0219607713500031>
54. Adamo I., Bocchio R. Nephrite jade from Val Malenco, Italy: Review and Update. *Gems and Gemology*. 2013;49(2):98–106. <https://doi.org/10.5741/GEMS.49.2.98>
55. Korybska-Sadłó I., Gil G., Gunia P., et al. Raman and FTIR spectra of nephrites from the Złoty Stok and Jordanów Śląski (the Sudetes and Fore-Sudetic Block, SW Poland). *Journal of Molecular Structure*. 2018;1166:40–47. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.04.020>
56. Gil G., Barnes J.D., Boschi C. Nephrite from Złoty stok (Sudetes, SW Poland): petrological, geochemical, and isotopic evidence for a dolomite-related origin. *The Canadian Mineralogist*. 2015;53:533–556. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500018>
57. Gil G., Bagiński B., Gunia P., et al. Comparative Fe and Sr isotope study of nephrite deposits hosted in dolomitic marbles and serpentinites from the Sudetes, SW Poland: Implications for Fe-As-Au-bearing skarn formation and post-obduction evolution of the oceanic lithosphere. *Ore Geology Reviews*. 2020;118:103335. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103335>
58. Платонов А.Н., Таран М.Н., Балицкий В.С. *Природа окраски самоцветов*. М.: Недра; 1984. 196 с.
Platonov A.N., Taran M.N., Balitsky V.S. *The nature of the color of gems*. Moscow: Nedra Publ. House; 1984. 196 p. (In Russ.)
59. Свиридов Д.Т., Свиридова Р.К., Смирнов Ю.Ф. *Оптические спектры ионов переходных металлов в кристаллах*. М.: Наука, 1976. 266 с.
Sviridov D.T., Sviridova R.K., Smirnov Yu.F. *Optical spectra of transition metal ions in crystals*. Moscow: Nauka Publ. House; 1976. 266 p. (In Russ.)



Информация об авторах

Евгений Владимирович Кислов – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН), г. Улан-Удэ, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-2266-0942](https://orcid.org/0000-0003-2266-0942); e-mail evg-kislov@ya.ru

Людмила Ивановна Худякова – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук (БИП СО РАН), г. Улан-Удэ, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-1423-410X](https://orcid.org/0000-0003-1423-410X); e-mail lkhud@binm.ru

Анатолий Германович Николаев – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ), г. Казань, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-8082-6536](https://orcid.org/0000-0002-8082-6536), ResearcherID [F-7024-2017](https://orcid.org/F-7024-2017)

Information about the authors

Evgeniy V. Kislov – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Associate Professor, Leading Researcher, Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation; Zavaritsky ORCID [0000-0003-2266-0942](https://orcid.org/0000-0003-2266-0942); e-mail evg-kislov@ya.ru

Liudmila I. Khudyakova – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Baikal Institute of Nature Management of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation; ORCID [0000-0003-1423-410X](https://orcid.org/0000-0003-1423-410X); e-mail lkhud@binm.ru

Anatoly G. Nikolaev – Cand. Sci. (Geol. and Min.), Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation; ORCID [0000-0002-8082-6536](https://orcid.org/0000-0002-8082-6536), ResearcherID [F-7024-2017](https://orcid.org/F-7024-2017)

Поступила в редакцию	24.01.2023
Поступила после рецензирования	15.02.2023
Принята к публикации	14.03.2023

Received	24.01.2023
Revised	15.02.2023
Accepted	14.03.2023



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105>

УДК 536:24:622.413

**Влияние способа учета абсолютных источников тепла на точность прогноза температуры в подземных сооружениях криолитозоны**А. Ф. Галкин¹ , В. Ю. Панков² ¹ Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация² Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация afgalkin@mail.ru**Аннотация**

Прогноз теплового режима выработок и окружающего их массива горных пород является необходимым элементом проектирования подземных сооружений криолитозоны, в частности, при обосновании и выборе надежных способов и средств крепления породных обнажений, обеспечивающих безопасную эксплуатацию подземных сооружений в течение всего нормативного срока. Даже изменение температуры дисперсных мерзлых пород в диапазоне отрицательных значений (ниже температуры плавления льда в породе) приводит к уменьшению их прочностных характеристик, а следовательно, и к снижению устойчивости выработок. Целью исследований было сравнение двух способов учета абсолютных источников тепла (как точечных источников и как равномерно распределенных по длине выработки источников) при прогнозе теплового режима в горных выработках подземных сооружений. Получены расчетные зависимости для определения температурных отклонений при различных способах учета абсолютных источников. Для общности анализа расчетные зависимости получены в безразмерном (критериальном) виде. Проведены варианты расчеты, результаты которых представлены в виде графиков, позволяющих наглядно оценить влияние способа учета источников тепла на точность прогноза температуры воздуха в подземном сооружении. Установлены основные качественные и количественные особенности формирования теплового режима в выработках при различных способах учета абсолютных источников тепла. В частности, показано, что при переходе от отрицательного теплового режима в выработке к положительному неправильный учет действия абсолютных источников тепла может привести к изменению глубины оттаивания дисперсных пород почти на 30 % (в 1,26 раза). В то же время установлено, что при положительном тепловом режиме для начальной температуры воздуха в сооружении больше 7,5 °С принципиальной разности для инженерных расчетов в способе учета абсолютных источников тепла нет.

Ключевые слова

подземное сооружение, криолитозона, безопасность, тепловой режим, прогноз, источник тепла, способ учета, температура

Для цитирования

Galkin A. F., Pankov V. Yu. Absolute heat sources as a method to check the accuracy of temperature prediction in underground structures within cryolithozone. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):207–214. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Absolute heat sources as a method to check the accuracy of temperature prediction in underground structures within cryolithozoneA. F. Galkin¹ , V. Yu. Pankov² ¹ P. I. Melnikov Geocryology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation² North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Yakutsk, Russian Federation afgalkin@mail.ru**Abstract**

Forecasting the thermal regime of mine workings and the surrounding rock mass is a necessary element of the design of underground structures in cryolithic zone. This is particularly necessary when substantiating and selecting reliable methods and means of rock supporting, in order to ensure safe operation of underground structures during the entire standard service life. Changes in the temperature of discontinuous permafrost



rocks in the range of negative values (below the ice point in the rock) can lead to a decrease in their strength characteristics, and consequently to a decrease in the stability of workings. The aim of the research was to compare two ways of considering absolute heat sources (point sources and sources uniformly distributed along the length of a mine working) when forecasting the thermal regime in mine workings of underground structures. The dependencies used to determine temperature differences in various methods of considering absolute heat sources were established. For the sake of generality, the dependencies were produced in dimensionless (criterial) form. The variants were calculated, and the results are presented in the form of graphs. The aim is to visually present the influence of the method of heat sources when considering the accuracy of air temperature prediction in an underground facility. Key qualitative and quantitative features of the formation of thermal regime in workings at different methods of considering absolute heat sources were established. It was shown in particular that during the transition from a negative temperature in a working to a positive one, incorrect consideration of the action of absolute heat sources can lead to an almost 30 % (1.26 times) difference (i.e., error) in the calculated depth of thawing of discontinuous rocks. It was also established that at a positive temperature, when the initial air temperature in a structure is more than 7.5 °C, there is no fundamental difference in engineering calculations results depending on the method of considering of absolute heat sources.

Keywords

underground structure, cryolithozone, safety, thermal regime, forecast, heat source, method of considering, temperature

For citation

Galkin A.F., Pankov V.Yu. Absolute heat sources as a method to check the accuracy of temperature prediction in underground structures within cryolithozone. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):207–214. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-105>

Введение

Надежность и безопасность инженерных сооружений в криолитозоне во многом определяются климатическими условиями и изменчивостью свойств грунтов и горных пород под действием внешних факторов: природных [1–3] и антропогенных [4–6]. Это относится как к наземным [7–9], так и к подземным инженерным сооружениям [10–12]. В научном сообществе, изучающем процессы взаимодействия инженерных сооружений с мерзлыми грунтами, давно утвердилось мнение, что главные технические и технологические параметры, определяющие безопасную эксплуатацию подземных сооружений в криолитозоне (как горного профиля, так и не связанного с горным производством), напрямую зависят от теплового режима выработок в период их строительства [13–15] и эксплуатации [16–18]. Прежде всего это объясняется зависимостью прочностных характеристик большинства мерзлых осадочных вмещающих пород от температуры [19–21]. Даже изменение температуры пород в диапазоне отрицательных значений ниже температуры плавления льда ($T \leq T_{пл}$) приводит к уменьшению их прочностных характеристик, а следовательно, и к снижению устойчивости выработок [22–24]. Многие виды дисперсных горных пород, например, льдонасыщенные песчаники вообще имеют нулевую прочность при положительных температурах [13, 16, 17]. Поэтому прогноз теплового режима выработок и окружающего их массива горных пород является необходимым элементом проектирования подземных сооружений криолитозоны. В частности, при обосновании и выборе надежных способов и средств крепления породных обнажений, обеспечивающих безопасную эксплуатацию подземных сооружений в течение всего нормативного срока [14, 25, 26]. Тепловой режим шахт, рудников

и подземных сооружений определяется действием двух групп источников тепла: абсолютных и относительных [13, 17, 27]. В данном случае уместно привести качественную характеристику групп этих источников, которую дал А. Ф. Воропаев [17]. «К первой группе относятся абсолютные источники тепла, которые отдают тепло и нагревают воздух на одинаковую величину при одних и тех же количествах развивающегося тепла независимо от собственно температуры воздуха. Ко второй группе относятся относительные источники тепла, от которых переход тепла и нагревание воздуха происходит вследствие разности температур – температурного напора». К относительным источникам тепла можно отнести такие источники, как поверхность горных выработок, трубопроводы различного назначения, транспортируемое полезное ископаемое и т.п. К группе абсолютных источников тепла относятся потери энергии в электросетях, осветительные приборы, работающие машины и механизмы и т.п. Существует достаточное количество научных исследований, в которых рассмотрены различные аспекты влияния абсолютных источников тепла [28–30], в том числе дизельной техники [29, 31, 32], на формирование теплового режима в подземных сооружениях различного назначения. Как правило, абсолютные источники тепла при построении математических моделей для прогноза теплового режима в подземном сооружении рассматриваются либо как точечные, либо как равномерно рассредоточенные по длине выработки.

Целью настоящих исследований было сравнение двух способов учета абсолютных источников тепловыделений при прогнозе теплового режима горных выработок подземных сооружений: а) как точечных источников; б) как равномерно распределенных по длине выработки источников.

Методы

С учетом ранее полученных зависимостей [17, 27, 33] для прогноза температуры воздуха в горных выработках различного назначения с использованием понятия коэффициента нестационарного теплообмена [34–36] исходные формулы для расчетов можно записать в следующем виде.

Разность температур в конечной точке при разных способах учета абсолютных источников тепла

$$\Delta t = t_{k1} - t_{k2} = Q_2 [Z(Kr + 1) - 1],$$

$$Z = \exp(-Kr). \quad (1)$$

Температура в конце горной выработки при распределенном по длине источнике тепла

$$t_{k1} = T_e + (t_0 - T_e + Q_1)Z. \quad (2)$$

Температура в конце горной выработки при действии точечного источника тепла

$$t_{k2} = T_e + Q_2 + (t_0 - T_e + Q_2)Z. \quad (3)$$

Входящие в формулы (1)–(3) параметры определяются по следующим зависимостям:

$$Q_1 = \frac{q}{GC_p}; \quad Q_2 = \frac{q}{FK_\tau}; \quad Kr = \frac{FK_\tau}{GC_p}, \quad (4)$$

где t_{k1} , t_{k2} – температура воздуха в конце выработки при распределенном (1) и точечном (2) источнике тепла, °C; T_e – естественная температура горных пород, °C; t_0 – начальная (на входе в выработку) температура воздуха, °C; q – мощность источника тепла, Вт; G – массовый расход воздуха в выработке, кг/с; C_p – удельная теплоемкость влажного воздуха, Дж/кгK; F – площадь поверхности горной выработки, м²; K_τ – коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/м²K; Kr – критерий Крменева.

Коэффициент нестационарного теплообмена для выработок различной симметрии может быть определен по известным в горной теплофизике выражениям, приведенным в работах [17, 27].

Формула для расчета относительной ошибки, которую можно допустить при прогнозе температуры, имеет следующий вид:

$$e = \left(1 - \frac{t_{k1}}{t_{k2}} \right) 100 \%. \quad (5)$$

При этом, следуя известным постулатам для инженерных расчетов, будем считать, что если выполняется условие $e \leq 10 \%$, то принципиального значения способ учета абсолютных источников тепла в горных выработках при прогнозе теплового режима не имеет.

Обсуждение результатов

Анализ полученных расчетных зависимостей показывает, что при первом способе учета (точечный источник) мы формально изменяем начальную температуру воздуха, подаваемую в выработку. Учет же абсолютных источников как равномерно распределенных по длине сооружения (второй способ учета) в математической модели эквивалентен изменению естественной температуры горных пород. Таким об-

разом, формально задача состоит в оценке степени влияния естественной температуры горных пород и начальной температуры воздуха в сооружении на точность прогноза температуры в конце горной выработки. Простое сравнение формул (2) и (3) позволяет сделать очевидный вывод о том, что равенство значений температур в конце горной выработки при разных способах учета действия абсолютных источников возможно только в том случае, если мощность источника нулевая. То есть, чем меньше мощность источника, тем меньше искомая разность температур воздуха в конце выработки. Количественный анализ должен помочь ответить на вопрос: «При какой мощности абсолютных источников способ их учета при прогнозе температуры не приведет к ошибке, большей, чем допустимая ошибка в инженерной практике?». Для ответа на данный вопрос по приведенным формулам были проведены варианты расчетов, результаты которых представлены в виде 2D и 3D графиков на рис. 1–4. На рис. 1 представлена зависимость разности температур в конце расчетного участка при различном способе учета абсолютных источников тепловыделений в зависимости критерия Крменева Kr при различной мощности источника Q_2 .

Как видно из графиков, разность температур в рассматриваемом диапазоне исходных данных не превышает 1,5 °C. Причем наблюдается следующая закономерность. Чем меньше мощность источника и значение критерия Крменева, тем меньше разность температур. То есть тем меньше зависимость конечного результата от способа учета абсолютных источников тепла.

На рис. 2 приведены обобщающие данный вывод 3D графики зависимости разности температур воздуха в конце расчетного участка при различном способе учета абсолютных источников тепловыделений в зависимости от приведенной мощности источника Q_2 и критерия Крменева – Kr .

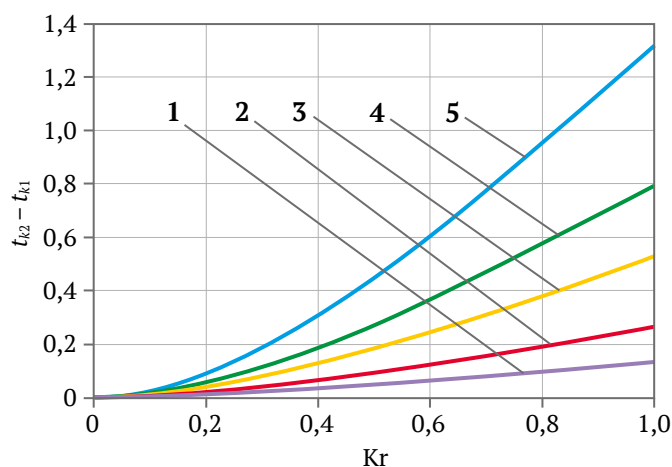


Рис. 1. Разность температур воздуха, °C, в конце расчетного участка выработки при различном способе учета абсолютных источников тепловыделений в зависимости критерия Крменева Kr при различном значении приведенной мощности источника Q_2 : 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 2,0; 4 – 3,0; 5 – 5,0

Из графиков на рис. 2 следует, что при учете источника тепла как рассредоточенного по длине мы всегда занижаем температуру воздуха в конце горной выработки. Причем от значений мощности действующих в выработке источников Q_2 и условий теплообмена воздуха с горными породами это не зависит. То есть возникающая ошибка не может быть отнесена в расчетный запас. Абсолютное же значение разности температур (рис. 3) не очень значительно во всем рассмотренном, характерном для подземных сооружений криолитозоны, диапазоне изменения исходных параметров моделирования теплового режима.

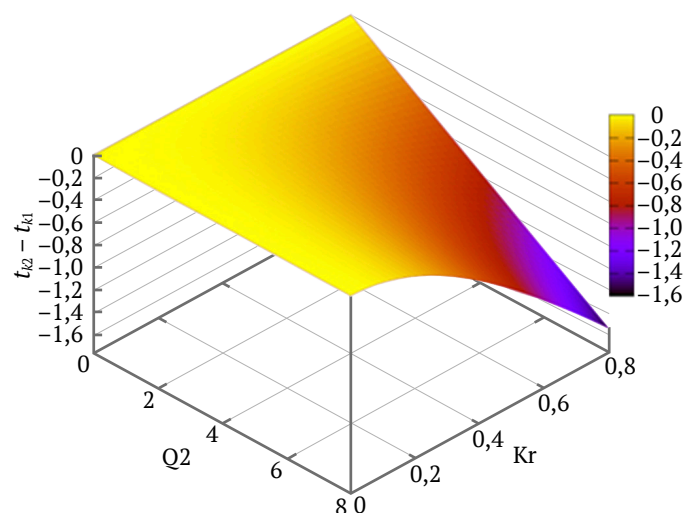


Рис. 2. Разность температур воздуха, °С, в конце расчетного участка при различном способе учета абсолютных источников тепловыделений в зависимости от приведенной мощности источника Q_2 и критерия Крменева

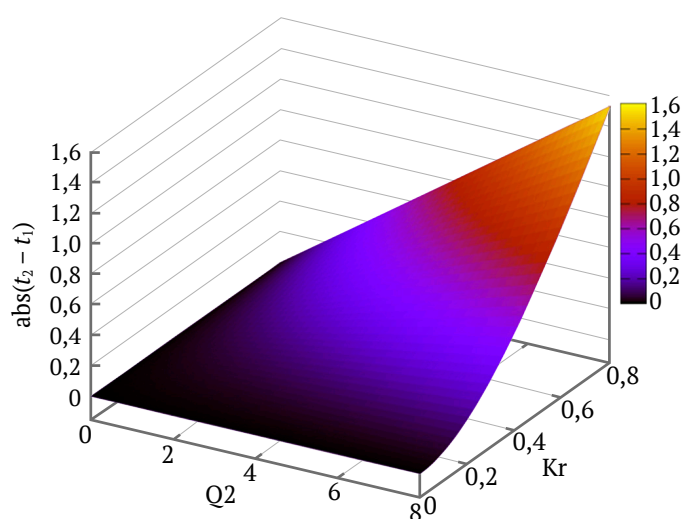


Рис. 3. Абсолютное значение разности температуры воздуха, °С, в конце расчетного участка в зависимости от приведенной мощности источника Q_2 и критерия Крменева

Как видно из графика на рис. 3, для характерных условий эксплуатации подземных сооружений в криолитозоне разность температур не превышает 1,6 °С. Это значение можно было бы считать вполне приемлемым, укладывающимся в точность инженерного прогноза. Однако следует учитывать, что эта разность не всегда может быть отнесена в расчетный запас. Например, при выборе способа и средства крепления выработок одним из определяющих расчетных параметров является глубина оттаивания горных пород. Глубина оттаивания и температура воздуха связаны между собой зависимостью, близкой к квадратичной. То есть, например, при переходе с отрицательного на положительный тепловой режим в сооружении за счет действия абсолютных источников тепла изменение температуры воздуха в сооружении на 1,6 °С (при прочих равных условиях) приведет к увеличению глубины оттаивания в 1,26 раза. Это превышает допустимую в инженерной практике величину в 10 %. Поэтому в подобных случаях надо ориентироваться на расчетную величину, полученную при моделировании абсолютных источников как точечных, поскольку в этом случае выбор способа учета источников является определяющим для получения правильного и надежного конечного результата расчета проектного параметра. Естественно, что все сказанное зависит от начальной температуры воздуха в подземном сооружении. На рис. 4 показана область начальных температур, при которой ошибка в расчете глубины оттаивания не превысит допустимого значения (выделено синим цветом на рисунке).

То есть, если начальная температура воздуха в сооружении меньше или равна приблизительно 7,5 °С, то способ учета абсолютных источников имеет значение для точности прогноза температуры. В противном случае – нет.

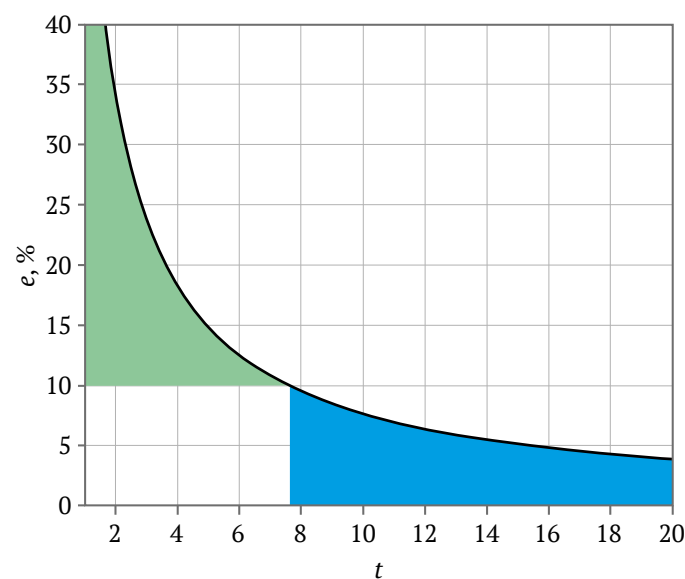


Рис. 4. Ошибка в определении глубины оттаивания мерзлых пород вокруг подземного сооружения в зависимости от начальной температуры воздуха t , °С



Заключение

Основные выводы, практическая значимость проведенного исследования и направление будущих исследований. Проведена качественная и количественная оценка влияния способа учета абсолютных источников тепла на температуру воздуха в горных выработках при прогнозе теплового режима подземных сооружений криолитозоны. Рассмотрены два возможных способа учета абсолютных источников тепла при математическом моделировании тепловых процессов в горных выработках: как точечных источников и как равномерно распределенных по длине выработки источников. Приведены формулы для определения температуры воздуха в конце горной выработки в зависимости от способа учета абсолютных источников. Для общности анализа расчетные формулы представлены в виде функциональных зависимостей от критерия Кремнева и приведенной суммарной мощности абсолютных источников тепла. Выполненный качественный анализ полученных зависимостей показал, что первый способ учета (точечный источник) эквивалентен изменению начальной температуры воздуха, подаваемого в выработку. Учет же абсолютных источников как равномерно распределенных по длине сооружения (второй способ учета) в математической модели эквивалентен изменению естественной температуры горных пород. Количественный анализ показал, в частности, что чем меньше мощность источника и значение критерия Кремнева, тем мень-

ше зависимость конечного результата (температуры воздуха в конце горной выработки) от способа учета абсолютных источников при прогнозе теплового режима. В качестве примера рассмотрено влияние способа учета абсолютных источников на точность прогноза глубины оттаивания дисперсных мерзлых пород вокруг выработки. Показано, что при переходе от отрицательного теплового режима в выработке к положительному неправильный учет действия абсолютных источников тепла может привести к изменению глубины оттаивания дисперсных пород почти на 30 % (в 1,26 раза). Это может оказать существенное влияние на выбор параметров крепления горных выработок, пройденных в дисперсных мерзлых породах, который напрямую зависит от температурного режима горных пород. В то же время установлено, что при положительном тепловом режиме для начальной температуры воздуха в сооружении больше 7,5 °С принципиальной разности для инженерных расчетов в способе учета абсолютных источников тепла нет. В целом же установлено, что для характерных условий строительства и эксплуатации подземных сооружений криолитозоны, например, золотодобывающих подземных рудников, принципиальной разницы в способах учета абсолютных источников тепла при прогнозе теплового режима нет. Отклонения в определении температуры воздуха в конце горной выработки при различных способах учета, как правило, не превышают допустимых в инженерной практике значений.

Список литературы

1. Zhirkov A., Permyakov P., Wen Z., Kirillin A. Influence of rainfall changes on the temperature regime of permafrost in Central Yakutia. *Land*. 2021;10(11):1230. <https://doi.org/10.3390/land10111230>
2. Станиловская Ю.В., Мерзляков В.П., Сергеев Д.О., Хименков А.Н. Оценка опасности полигонально-жильных льдов для линейных сооружений. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2014;(4):367–378.
3. Eppelbaum L.V., Kutasov I.M. Well drilling in permafrost regions: Dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019;38(2):3351. <https://doi.org/10.33265/polar.v38.3351>
4. Gao Q., Wen Z., Feng W. et al. Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan plateau. *Cold Regions Science and Technology*. 2020;178:103–116. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103116>
5. Zhelezniak M., Kirillin A., Zhirkov A. et al. Permafrost distribution and temperature in the Elkon Horst, Russia. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021;13(2):107–122. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2021.20027>
6. Wen Z., Wang D., Ma W. et al. Thermal interaction between a thermokarst lake and a nearby embankment in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;155:214–224. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.08.010>
7. Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Varlamov S.P. Numerical modeling of railway embankment deformations in permafrost regions, Central Yakutia. In: Petriaev A., Konon A. (eds.) *Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 50*. Singapore: Springer; 2020. Pp. 93–103. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_11
8. Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Шац М.М., Сивцев М.А. Численное моделирование изменения мерзлотных условий взлётно-посадочной полосы аэропорта Олекминск. *Маркшейдерия и недропользование*. 2021;(5):22–32.
9. Пермяков П.П., Жирков А.Ф., Железняк М.Н. Учет процесса внутрипочвенной конденсации при моделировании теплообмена в мерзлых грунтах. *Инженерно-физический журнал*. 2021;94(5):1260–1270. (Перев. вер.: Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N. Account for the process of underground condensation in modeling heat and moisture exchange in frozen soils. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94(5): 1232–1241. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02404-8>)
10. Kutasov I.M., Eppelbaum L.V. The effect of thermal properties changing (at ice-water transition) on the radius of permafrost thawing. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;151:156–158.



11. Железняк М.Н., Шац М.М. Теплофизическая характеристика алмазного месторождения «Айхал» (Якутия). *Недропользование XXI век*. 2022;(1):98–103. URL: <https://nedra21.ru/archive/160/2864/>
12. Николаева М.В., Стручкова Г.П. Прогнозирование теплового взаимодействия участка подземного трубопровода с льдистыми грунтами. *Технологии нефти и газа*. 2018;(4):56–60.
13. Дядькин Ю.Д. *Основы горной теплофизики*. М.: Недра; 1968. 256 с.
14. Скуба В.Н. *Исследование устойчивости горных выработок в условиях многолетней мерзлоты*. Новосибирск: Наука; 1974. 118 с.
15. Шерстов В.А. *Повышение устойчивости выработок россыпных шахт Севера*. Новосибирск: Наука; 1980. 56 с.
16. Кузьмин Г.П. *Подземные сооружения в криолитозоне*. Новосибирск: Наука; 2002. 176 с.
17. Воропаев А.Ф. *Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах*. М.: Недра; 1968. 249 с.
18. Вернигор В.М., Морозов К.В., Бобровников В.Н. О подходах к проектированию теплового режима рудников в условиях многолетнемерзлых пород. *Записки Горного института*. 2013;205:139–140. URL: https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5508?setLocale=ru_RU
19. Zhang S., Teng J., He Z. et al. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils. *Géotechnique*. 2016;66(11):927–940. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.016>
20. Teng J., Shan F., He Z. et al. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. *Géotechnique*. 2019;69(3):251–259. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.208>
21. Xu G., Qi J., Wu W. Temperature Effect on the compressive strength of frozen soils: a review. recent advances in geotechnical research. In: Wu, W. (eds.) *Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Springer, Cham.; 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19
22. Niu F., Li A., Luo J. et al. Soil moisture, ground temperatures, and deformation of a high-speed railway embankment in Northeast China. *Cold Regions Science and Technology*. 2017;133:7–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.007>
23. Хименков А.Н., Гагарин В.Е. Подходы к изучению деформаций в многолетнемерзлых грунтах. *Арктика и Антарктика*. 2022;(2):36–65. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2022.2.38229>
24. Вахрин И.С., Кузьмин Г.П., Спектр В.В. Деформационные характеристики оттаивающих грунтов естественного сложения. *Успехи современного естествознания*. 2020;(8):37–42. <https://doi.org/10.17513/use.37455>
25. Галкин А.Ф. Повышение устойчивости горных выработок в криолитозоне. *Записки Горного института*. 2014;207:99–102. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5392>
26. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Formation of thermal regime in a permafrost area mine. In: Beskopylny A., Shamtsyan M. (eds) *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 247*. Springer, Cham; 2022. Pp. 205–213. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_21
27. Щербань А.Н., Кремнев О.А. *Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт*. Киев: АН УССР; 1959. 430 с.
28. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Зайцев А.В. Влияние закладочных работ на формирование теплового режима в горных выработках в условиях рудников ОАО «Норильский никель». *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. 2012;(2):110–114.
29. Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Соловьев Д.Е. Особенности формирования теплового режима россыпных шахт криолитозоны при ведении добычных работ с применением самоходной техники. *Горный журнал*. 2015;(4):29–32. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.06>
30. Казаков Б.П., Зайцев А.В. Исследование процессов формирования теплового режима глубоких шахт и рудников. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2014;(10):91–97.
31. Галкин А.Ф., Дормидонтов А.В., Курта И.В., Короткова К.Б. Влияние дизельных машин на температурный режим горных выработок. *Естественные и технические науки*. 2018;(5):84–86.
32. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Фёдоров Я.В. Изменение температуры в камерах подземных сооружений при работе дизельных установок. *Вопросы безопасности*. 2022;(4):27–33. <https://doi.org/10.25136/2409-7543.2022.4.38938>
33. Черняк В.П., Щербань А.Н. Методы прогноза теплового режима глубоких шахт. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1977;(2):88–92.
34. Щербань А.Н., Черняк В.П., Брайчева Н.А. Решение системы дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами для расчета температуры рудничного воздуха. *Доклады Академии наук Украинской ССР. Серия А: Физико-математические и технические науки*. 1975;(9):843–847.
35. Добрянский Ю.П. *Расчеты на ЭВМ тепловлажностных режимов подземных выработок*. Киев: Наукова думка; 1991. 122 с.
36. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Forecasting of thermal regime in an oil mine. In: Mottaeva A. (eds.) *Technological Advancements in Construction. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 180*. Springer, Cham; 2022. Pp. 39–46. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8_4



References

1. Zhirkov A., Permyakov P., Wen Z., Kirillin A. Influence of rainfall changes on the temperature regime of permafrost in Central Yakutia. *Land*. 2021;10(11):1230. <https://doi.org/10.3390/land10111230>
2. Stanilovskaya Yu.V., Merzlyakov V.P., Sergeev D.O., Khimenkov A.N. Ice wedge hazard assessment for linear objects. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2014;(4):367–378. (In Russ.)
3. Eppelbaum L.V., Kutasov I.M. Well drilling in permafrost regions: Dynamics of the thawed zone. *Polar Research*. 2019;38(2):3351. <https://doi.org/10.33265/polar.v38.3351>
4. Gao Q., Wen Z., Feng W. et al. Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan plateau. *Cold Regions Science and Technology*. 2020;178:103–116. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103116>
5. Zhelezniak M., Kirillin A., Zhirkov A. et al. Permafrost distribution and temperature in the Elkon Horst, Russia. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2021;13(2):107–122. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2021.20027>
6. Wen Z., Wang D., Ma W. et al. Thermal interaction between a thermokarst lake and a nearby embankment in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;155:214–224. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.08.010>
7. Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Varlamov S.P. Numerical modeling of railway embankment deformations in permafrost regions, Central Yakutia. In: Petriaev A., Konon A. (eds.) *Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Volume 2. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 50*. Singapore: Springer; 2020. Pp. 93–103. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_11
8. Zhirkov A., Zheleznyak M., Shats M., Sivtsev M. Numerical simulation change permafrost conditions of the runway airport Olekminsk. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2021;(5):22–32. (In Russ.)
9. Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N. Account for the process of underground condensation in modeling heat and moisture exchange in frozen soils. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021;94(5):1232–1241. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02404-8> (Orig. ver.: Permyakov P.P., Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N. Account for the process of underground condensation in modeling heat and moisture exchange in frozen soils. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal*. 2021;94(5):1260–1270. (In Russ.))
10. Kutasov I.M., Eppelbaum L.V. The effect of thermal properties changing (at ice-water transition) on the radius of permafrost thawing. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;151:156–158.
11. Zheleznyak M.N., Shatz M.M. Teplofizikal conditions of diamond deposit of the Aikhal (Yakutia). *Nedropol'zovaniye XXI Vek*. 2022;(1):98–103. (In Russ.) URL: <https://nedra21.ru/archive/160/2864/>
12. Nikolaeva M.V., Struchkova G.P. Forecasting the thermal interaction of underground pipeline with ice grounds. *Tekhnologii Nefti i Gaza*. 2018;(4):56–60. (In Russ.)
13. Dyadkin Yu.D. *Fundamentals of mining thermal physics*. Moscow: Nedra Publ.; 1968. 256 p. (In Russ.)
14. Skuba V.N. *Study of mine workings stability in permafrost conditions*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1974. 118 p. (In Russ.)
15. Sherstov V.A. *Improving stability of mine workings at placer mines in the North*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1980. 56 p. (In Russ.)
16. Kuzmin G.P. *Underground structures in cryolithozone*. Novosibirsk: Nauka Publ.; 2002. 176 p. (In Russ.)
17. Voropaev A.F. *Theory of heat exchange of mine air and rocks in deep mines*. Moscow: Nedra Publ.; 1968. 249 p. (In Russ.)
18. Vernigor V.M., Morozov K.V., Bobrovnikov V.N. On approaches to designing of thermal regime at ore mines under permafrost conditions. *Journal of Mining Institute*. 2013;205:139–140. (In Russ.) URL: https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5508?setLocale=en_US
19. Zhang S., Teng J., He Z. et al. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils. *Géotechnique*. 2016;66(11):927–940. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.016>
20. Teng J., Shan F., He Z. et al. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand. *Géotechnique*. 2019;69(3):251–259. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.208>
21. Xu G., Qi J., Wu W. Temperature Effect on the compressive strength of frozen soils: a review. recent advances in geotechnical research. In: Wu, W. (eds.) *Recent Advances in Geotechnical Research. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. Springer, Cham; 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19
22. Niu F., Li A., Luo J. et al. Soil moisture, ground temperatures, and deformation of a high-speed railway embankment in Northeast China. *Cold Regions Science and Technology*. 2017;133:7–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.007>
23. Khimenkov A.N., Gagarin V.E. Approaches to the study of deformations in permafrost soils. *Arctic and Antarctica*. 2022;(2):36–65. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2022.2.38229>
24. Vakhnin I.S., Kuzmin G.P., Spektr V.V. Haw deformation characteristics of undisturbed soils. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020;(8):37–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37455>
25. Galkin A.F. Increase of stability of mine workings in the permafrost zone. *Journal of Mining Institute*. 2014;207:99–102. (In Russ.) URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5392>



26. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Formation of thermal regime in a permafrost area mine. In: Beskopylny A., Shamtsyan M. (eds) *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 247*. Springer, Cham; 2022. Pp. 205–213. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_21
27. Shcherban A.N., Kremnev O.A. *Scientific basis for calculating and regulating thermal regime of deep mines*. Kyiv: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR; 1959. 430 p. (In Russ.)
28. Kazakov B., Zaitsev A., Shalimov A. Influence of backfill operations on the formation of thermal conditions of mine workings in OJSC MMC "Norilsk Nickel". *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2012;(2):110–114. (In Russ.)
29. Kurilko A.S., Khokholov Yu.A., Soloviev D.E. Features of formation of temperature conditions in placer mines equipped with self-propelled machines in permafrost zone. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(4):29–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.04.06>
30. Kazakov B.P., Zaitsev A.V. Study of the formation of thermal regimes in deep mines. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2014;(10):91–97. (In Russ.)
31. Galkin A.F., Dormidontov A.V., Kurta I.V., Korotkova K.B. Influence of diesel vehicles on the temperature regime of mine workings. *Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki*. 2018;(5):84–86. (In Russ.)
32. Galkin A., Pankov V.Y., Fedorov Y.V. Temperature Change in the Chambers of Underground Structures when operating Diesel Units. *Security Issues*. 2022;(4):27–33. <https://doi.org/10.25136/2409-7543.2022.4.38938>
33. Chernyak V.P., Shcherban A.N. Methods for predicting thermal regime of deep mines. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 1977;(2):88–92 (In Russ.)
34. Shcherban A.N., Chernyak V.P., Braicheva N.A. Solution of a system of differential equations with variable coefficients to calculate the temperature of mine air. *Doklady Akademii nauk Ukrainskoy SSR. Seriya A: Fiziko-Matematicheskie i Tekhnicheskie Nauki*. 1975;(9):843–847 (In Russ.)
35. Dobryansky Yu.P. *Computations of heat and humidity regimes of underground workings*. Kyiv: Naukova Dumka Publ.; 1991. 122 p. (In Russ.)
36. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Forecasting of thermal regime in an oil mine. In: Mottaeva A. (eds.) *Technological Advancements in Construction. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 180*. Springer, Cham; 2022. Pp. 39–46. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8_4

Информация об авторах

Александр Фёдорович Галкин – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-5924-876X](https://orcid.org/0000-0002-5924-876X), Scopus ID [56559565600](https://orcid.org/56559565600); e-mail afgalkin@mail.ru

Владимир Юрьевич Панков – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-4933-0265](https://orcid.org/0000-0003-4933-0265), Scopus ID [57216812632](https://orcid.org/57216812632); e-mail pankov1956@inbox.ru

Information about the authors

Alexander F. Galkin – Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Geothermal Permafrost, Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-5924-876X](https://orcid.org/0000-0002-5924-876X), Scopus ID [56559565600](https://orcid.org/56559565600); e-mail afgalkin@mail.ru

Vladimir Yu. Pankov – Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Associate Professor of the Department of Automobile Roads and Airfields, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; ORCID [0000-0003-4933-0265](https://orcid.org/0000-0003-4933-0265), Scopus ID [57216812632](https://orcid.org/57216812632); e-mail pankov1956@inbox.ru

Поступила в редакцию 01.04.2023
Поступила после рецензирования 19.06.2023
Принята к публикации 20.06.2023

Received 01.04.2023
Revised 19.06.2023
Accepted 20.06.2023



ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-112>

УДК 622.7

Обогащение каолиновой руды месторождения Тамазерт (Алжир)
методом пенной флотации

М. Лараба

Университет Эхахида Шейха Ларби Тебесси, г. Тебесса, Алжир

larabamd@univ-tebessa.dz

Аннотация

Целью данного исследования является изучение процесса удаления окрашивающих примесей из каолиновой руды месторождения Тамазерт (тамазертский каолин, ТК), расположенного в восточном регионе Алжира, с использованием процесса пенной флотации. Исследования методами рентгенофлуоресцентной спектроскопии, сканирующей растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа показали, что данный местный материал представляет собой алюмосиликат, содержащий каолинит, а также примеси Fe_2O_3 (> 2,7 % по весу) и TiO_2 (0,28 % по весу), которые способствуют его окрашиванию. После гомогенизации, дробления и измельчения ТК был подвергнут серии испытаний по пенной флотации. Результаты показали, что тамазертский каолин приобретает благоприятные характеристики после применения пенной флотации для улучшения его свойств. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что все фракции могут быть эффективно обогащены методом пенной флотации с оптимальным массовым выходом по весу (извлечением по весу) 79,84 % в концентрат для фракции 20–40 мкм. Содержания железа и титана, являющихся основными окрашивающими примесями в тамазертском каолине, были снижены посредством флотационной обработки с 2,7 до 0,08 % по весу для Fe_2O_3 во фракции 20–40 мкм и с 0,28 до 0,04 % по весу для TiO_2 в той же фракции, что было показано в оптимальном испытании. Значительное снижение содержаний окрашивающих примесей (Fe_2O_3 и TiO_2), достигнутое в процессе флотации, подтверждает, что железо присутствует в тамазертском каолине в свободном состоянии. В итоге можно утверждать, что процесс пенной флотации может быть потенциально эффективным способом улучшения качества каолиновой руды Тамазерта путем удаления Fe_2O_3 и TiO_2 с удовлетворительными результатами, отвечающими требованиям местных компаний.

Ключевые слова

тамазертский каолин, пенная флотация, окрашивающие примеси, Fe_2O_3 , TiO_2

Благодарности

Автор выражает благодарность профессору Хуану Марии Менендес-Агуадо из отдела горных работ и разведки лаборатории обогащения полезных ископаемых Политехнического института Миереса Университета Овьедо, Астурия, Испания, за техническую поддержку данной исследовательской работы.

Для цитирования

Laraba M. Enrichment of Algerian kaolin using froth flotation method. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):215–222. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-112>

BENEFICIATION AND PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS

Research paper

Enrichment of Algerian kaolin using froth flotation method

M. Laraba

Echahid Cheikh Larbi Tebessi University, Tébessa, Algeria

larabamd@univ-tebessa.dz

Abstract

The objective of this research is to study the removal of coloring impurities from Algerian kaolin ore (Tamazert kaolin, TK) located in the eastern region of Algeria, utilizing froth flotation process. The results obtained from XRF, SEM, and XRD characterization demonstrate that this local material is an alumino-silicate containing kaolinite, along with impurities such as Fe_2O_3 (> 2.7 % by weight) and TiO_2 (0.28 % by weight) which contribute to its coloring. After homogenization, crushing and milling, several froth flotation tests were conducted on TK. The results revealed that Tamazert kaolin exhibits favorable performance with froth flotation, in order to improve its properties. Based on the results obtained, it can be concluded that all fractions can be treated effectively using froth flotation with an optimal mass yield (weight recovery) of 79.84 % in concentrate for the



fraction of 20–40 μm . Iron and titanium, the main coloring impurities in Tamazert kaolin, were reduced from 2.7 % to 0.08 % by weight for Fe_2O_3 in the fraction 20–40 μm , and from 0.28 % to 0.04 % by weight for TiO_2 in the same fraction, as determined by the optimum test. The significant reduction in coloring impurities (Fe_2O_3 and TiO_2) achieved through the flotation process confirms that iron is present in a free state in Tamazert kaolin. It can be ultimately confirmed that the froth flotation process can be a potentially effective process to improve the quality of Tamazert kaolin ore by removing Fe_2O_3 and TiO_2 with satisfactory results which meet the requirements of local companies.

Keywords

Tamazert kaolin, froth flotation, coloring impurities, Fe_2O_3 , TiO_2

Acknowledgements

The author expresses his gratitude to Professor Juan Maria Menendez-Aguado at Mining Exploitation & Prospecting Dept., Mineral Raw Processing Material Laboratory, Polytechnic School of Mieres, University of Oviedo, Asturias, Spain, for the technical support of this research work.

For citation

Laraba M. Enrichment of Algerian kaolin using froth flotation method. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):215–222. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-04-112>

Введение

Каолин представляет собой мелкозернистую горную породу обычно белого цвета и химически инертную. Он широко используется во многих областях промышленности [1, 2] благодаря таким своим свойствам, как природная белизна, мелкий размер частиц, пластичность, неабразивность и химическая устойчивость. Основными примесями, входящими в состав товарного каолина, являются кварц, полевой шпат, мусковит, биотит, оксиды титана и оксиды или гидроксиды железа, такие как гетит, гематит и магнетит [3, 4].

Существует множество методов обогащения каолиновой руды. К ним относятся селективная флокуляция, магнитная сепарация, отбелка и флотация для удаления окрашивающих примесей. Присутствие оксидов железа в каолине отрицательно сказывается на окраске каолина, степень белизны/светлоты которого уменьшается с увеличением содержания железа [2, 5, 6].

Флотация, несомненно, является наиболее важным и универсальным методом разделения минералов, и сфера ее использования и применения для обработки больших объемов и охвата новых областей постоянно расширяется [7].

Флотация – это процесс разделения, в котором используются естественные и индуцированные различия в поверхностных свойствах минералов: поверхность легко смачивается водой, т.е. гидрофильная, или отталкивает воду, т.е. гидрофобная. Если минеральная частица гидрофобна, то она может прикрепляться к пузырькам воздуха и всплывать. Это сложная система, включающая три фазы (твердые частицы, воду и воздух) и взаимодействие химических и физических переменных [7].

Успех флотационных технологий зависит прежде всего от склонности поверхностно-активных веществ концентрироваться на границе раздела фаз (твердое–жидкое), а также от их способности делать гидрофобными выбранные неповерхностно-активные материалы путем адсорбции или ассоциации [8].

Пенная флотация является доминирующим методом обогащения минералов и достигла большого коммерческого успеха [9]. При пенной флотации в пульпу измельченных частиц в воде добавляют необходимые

флотореагенты, включая модификаторы pH и поверхностно-активные вещества. Затем она перемешивается в камере в присутствии воздуха, всасываемого или подаваемого в зону мешалки, где воздух эффективно рассеивается/распределяется за счет интенсивного перемешивания в этой зоне. Пузырьки воздуха сталкиваются с частицами и прикрепляются к тем из них, которые являются гидрофобными или приобрели гидрофобность. Агрегаты пузырьки-частицы поднимаются в верхнюю часть ячейки и удаляются путем снятия пены [8].

При пенной флотации параметры, которые могут влиять на эффективность разделения, следующие [10]: тип руды, доза реагентов, размер частиц, плотность пульпы, продолжительность выдерживания, pH и т.д.). Оптимальный диапазон размеров частиц при пенной флотации зависит от параметров процесса флотации и типа флотационной машины. Слишком крупные или мелкие частицы не подходят для флотации, поэтому подходящий размер для флотации имеет верхний и нижний пределы [11].

Флотация – это технология, используемая для удаления TiO_2 , особенно если каолин окрашен железом [12].

Каолинит гидрофилен. Поэтому при добавлении небольшого количества химического диспергатора для нейтрализации граничных зарядов, возникающих в результате разрыва связей, он будет легко диспергироваться в воде. Ионные и/или полярные неионные ПАВ могут быть нанесены на поверхности частиц каолинита для их модификации с целью получения частиц, обладающих гидрофобными или органофильными свойствами [13].

Флотация используется также для повышения белизны каолина, предназначенного для бумажной промышленности [13–15].

Целью настоящей работы является исследование возможностей улучшения качества каолина месторождения Тамазерт (рис. 1) методом пенной флотации путем извлечения (удаления) железа. Следствием этого является повышение уровня белизны и светлоты, требуемых для большинства промышленных применений.



Рис. 1. Каолиновое месторождение Тамазерт

Материалы и методы экспериментов

Характеристика тамазертского каолина

Для данного исследования репрезентативная проба каолиновой руды была отобрана на руднике Тамазерт, расположенном вблизи города Джиджел на востоке Алжира. Проба была исследована методами рентгенофлуоресцентной спектрометрии (XRF), рентгенофазового анализа (XRD) и сканирующей растровой электронной микроскопии (SEM) в сочетании с энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализом (EDX или PCMA).

Исследования методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии (XRF) выполняли на XRF анализаторе Thermo Niton XL3t. Исследования методом сканирующей растровой электронной микроскопии с PCMA (SEM-EDX) выполняли на приборе JEOL JSM-5600. Поверхность тонкого среза образца покрывали металлом (Au). Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре PHILIPS-X'Pert MPD System, оснащенный источником Cu-K α ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) излучения, которое генерировалось при токе 40 мА. Для определения характеристик пробы каолина были выполнены настройки генератора 45 кВ.

Для изучения морфологии тамазертского каолина использовали сканирующую электронную микроскопию (SEM). Для определения минералогического состава использовался рентгенофазовый (рентгеноструктурный) анализ, а для определения химического состава – рентгенофлуоресцентный.

Использованные материалы

Пробы измельчали на лабораторной мельнице Retsch RS 100, затем просеивали для получения пяти фракций: (0–20, 20–40, 40–80, 80–100 и 100–120 мкм). Для проведения испытаний обычно использовали следующее оборудование: флотационную машину (KHD HUMBOLDT WEDAG AG) с объемом бака 1,5 л, pH-метр, электронные весы, магнитную мешалку и печь.

Использованные реагенты

Большинство минералов в естественном состоянии не обладают гидрофобными (водоотталкивающими) свойствами, поэтому в пульпу необходимо добавлять флотационные реагенты. Наиболее важными

реагентами являются собиратели, которые адсорбируются на поверхностях минералов, делая их гидрофобными и облегчая прикрепление пузырьков. Для управления процессом флотации используются регуляторы. Они либо активизируют, либо ослабляют прикрепление минералов к пузырькам воздуха, а также используются для контроля дисперсности частиц и pH системы. Пенообразователи позволяют получать мелкие пузырьки, необходимые для увеличения скорости столкновений и позволяющие поддерживать достаточно стабильную пену [7]. Химические реагенты, использованные для проведения флотационных испытаний, представлены в табл. 1. Все реактивы были предоставлены лабораторией обогащения полезных ископаемых Политехнического института Миереса Университета Овьедо, Испания.

Таблица 1

Реагенты, применяемые при пенной флотации ТК

Реагент	Формула	Назначение
Олеиновая кислота	$C_{18}H_{34}O_2$	Собиратель
Метилизобутилкарбинол (МИБК)	$C_6H_{14}O$	Пенообразователь
Метасиликат натрия (пентагидрат силиката натрия)	$Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ $Na_2SiO \cdot 5H_2O$	Депрессор
Керосин	$C_{10}H_{22}$	Активатор
Гидроксид натрия	NaOH	Регулятор pH

Экспериментальная методика флотации

Каждая истертая проба каолина (250 г) вводилась в камеру флотомашины с 1000 г (1 л) воды для получения пульпы (суспензии), содержащей 25% твердого вещества по весу. Затем постепенно добавляли разбавленный раствор гидроксида натрия, чтобы отрегулировать pH флотационной пульпы на уровне 9,5. После добавления 9 мл метасиликата натрия оставляли машину работать в течение приблизительно 5 мин, затем добавляли 4 капли ($\approx 0,84 \text{ г}$) керосина для придания полезному минералу (каолину) гидрофобности и продолжали процесс в течение 2 мин. Затем

постепенно добавляли в камеру 13 капель раствора олеиновой кислоты ($\approx 0,338$ г) и выдерживали содержимое камеры в течение 5 мин. Олеиновая кислота играла роль собирателя. В конце добавляли 3 капли метилизобутилкарбинола (МИБК) и выдерживали суспензию в течение 2 мин. Затем открывали воздушный кран для создания пены (пузырьков воздуха), необходимой для флотации (Fernando Pita, 2017). Эта операция называется барботированием. Все испытания проводились при комнатной температуре; флотационная машина была настроена на скорость вращения 450 об/мин для всех испытаний. Флотационные испытания проводились на флотационной машине KHD HUMBOLDT WEDAG AG.

Дзета-потенциал каолинита отрицателен в широком диапазоне значений pH, и каолин может флотироваться аминными собирателями в кислой и щелочной среде [16–18]. Высушенные концентраты и хвосты были подвергнуты анализу. Полученные результаты использовали для расчета содержания, выхода и коэффициента извлечения.

Полученные после флотации концентраты и хвосты сушили в печи при температуре 105 °C в течение 24 ч. Все эти этапы в обобщенном виде представлены на рис. 2.

Результаты и обсуждение

Результаты определения характеристик каолина

Рентгенофлуоресцентный анализ (XRF)

Химические анализы пробы каолина приведены в табл. 2. Проба каолина богата SiO_2 – 46,70 % и Al_2O_3 – 32,67 %. Отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в этой пробе составляло 1,43. Отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в минерале каолинит обычно составляет 1,18¹ (Kaolinite Mineral Data (Информация о минерале каолинит)). Рентгенофлуоресцентные измерения для определения оксидного состава каолина проводились на рентгенофлуоресцентном анализаторе Thermo Niton XL3t.

Химический анализ показал, что тамазертский каолин характеризуется высоким содержанием Fe_2O_3 (2,70 %), SiO_2 (46,70 %) и K_2O (2,58 %). Содержание TiO_2 низкое – 0,28 %.

Потери при прокаливании ТК относительно невелики – 9,36%. Они меньше значения потерь при прокаливании чистого каолинита [19], что свидетельствует о незначительном присутствии органического вещества. Это может быть связано с присутствием слюды.

Значение отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (1,27 (соотношение вес. %)) тамазертского каолина отличается от такового идеального каолинита, которое составляет 1,18. Это может быть связано с присутствием глинозема в данном каолине.

Присутствие Fe_2O_3 дает коричневатое окрашивание и снижает светлоту и белизну каолина. Низкое содержание TiO_2 делает тамазертский каолин очень привлекательным сырьем для ряда отраслей промышленности.

¹ Kaolinite Mineral Data (Информация о минерале каолинит). URL: <http://www.webmineral.com/data/Kaolinite.shtml#.W1CcFZuLIU>

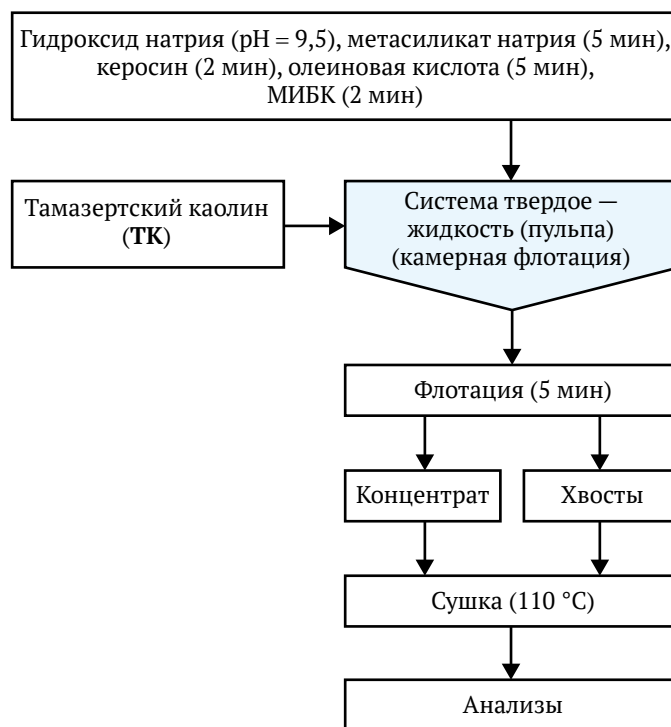


Рис. 2. Блок-схема, обобщающая этапы флотации каолина (ТК)

Исследования методом сканирующей растровой электронной микроскопии с PCMA (SEM – EDX)

На рис. 3 представлены SEM-микрофотографии тамазертского каолина. Соотношение химических элементов в каолине устанавливалось методом энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (EDX или PCMA). Для определения морфологии и состава каолина использовали метод сканирующей растровой электронной микроскопии (SEM) с прибором JEOL-JSM 6610-IV, совмещенным с микроанализатором OXFORD INCA-ENERGY (PCMA).

В общем виде морфологически каолин представлен пластинами каолинита гексагональной формы. По результатам сканирующей электронной микроскопии с PCMA (SEM-EDS) на микрофотографии (рис. 3, А) представлена несовершенная структура каолинита. Микрофотография показывает, что частицы имеют неправильные и плоские пластинчатые формы. Кроме того, частицы каолинита окружены частицами кварца. По данным Амиго с соавт. (Amigo et al.) [20], тамазертский каолин имеет более или менее низкую кристалличность. На рис. 3, Б показано присутствие в этом каолине примеси гематита (Fe_2O_3).

Рентгенофазовый (рентгеноструктурный) анализ (XRD)

Рентгенофазовый анализ (XRD) выполнялся на дифрактометре PHILIPS-X'Pert MPD System с $\text{CuK}\alpha$ -излучением, настроенном на 40 мА и 45 кВ. На рис. 4 видно, что минералогический состав тамазертского каолина представлен в основном каолинитом, кварцем, мусковитом и иллитом.

Результаты флотационных испытаний

Полученные в результате флотационных испытаний продукты (пена и хвосты) высушивались в печи при температуре 105 °С в течение 24 ч. Пена, содержащая частицы каолина (гидрофобные), извлекалась путем ее слива с поверхности флотационной камеры, а хвосты (гидрофильные) оставались в нижней части камеры и состояли в основном из оксидов железа и титана. Было установлено, что регулирование подачи воздуха во флотационную камеру в начальный

период флотации очень важно как для загрузки воздушных пузырьков минералами, так и для их отрыва. Кроме того, для удовлетворительного формирования пенного слоя необходимо время вспенивания 5 мин и более.

Результаты расчета материального баланса и выхода флотации для каждого испытания приведены в табл. 3. Химический анализ концентратов, полученных в результате флотационного процесса, приведен в табл. 4.

Таблица 2

Химический состав (вес. %) каолиновой руды (ТК)

Проба	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
ТК	46,70	36,67	2,70	0,02	0,21	0,12	0,19	2,58	0,28	0	9,36	1,27
Каолинит КGa-1b (малодефектный)	44,20	39,70	0,21	0	0,03	0	0,013	0,05	1,39	0	13,49	1,11
Идеальный каолинит*	46,55	39,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,18

ППП (потери при прокаливании): измерены при температуре 1000 °С.

Источник: Формация Таскалуза, округ Вашингтон, Джорджия, США

* Идеальный каолинит: относится к высокочистому, мелкозернистому, без примесей, высокой белизны и блеска, с превосходной пластичностью, термической стабильностью и другими специфическими свойствами, подходящими для его предполагаемого применения, например, при производстве керамики, бумаги, красок или фармацевтических препаратов.

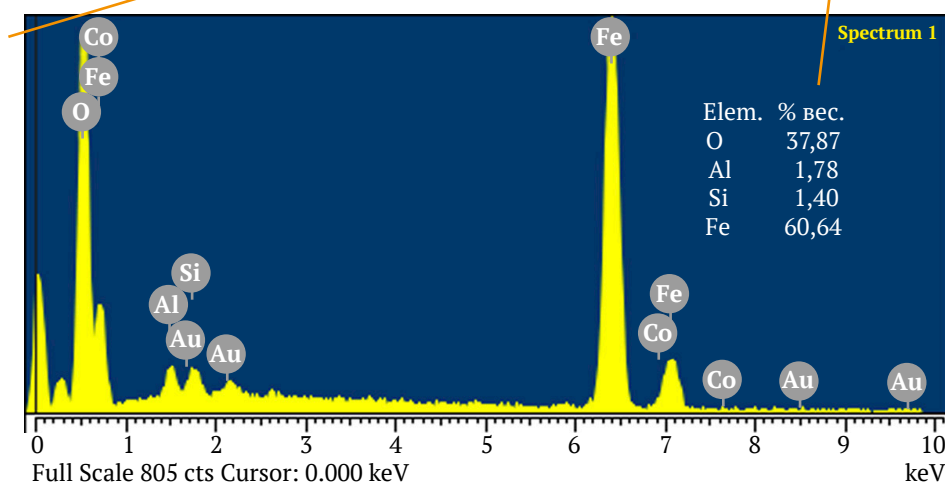
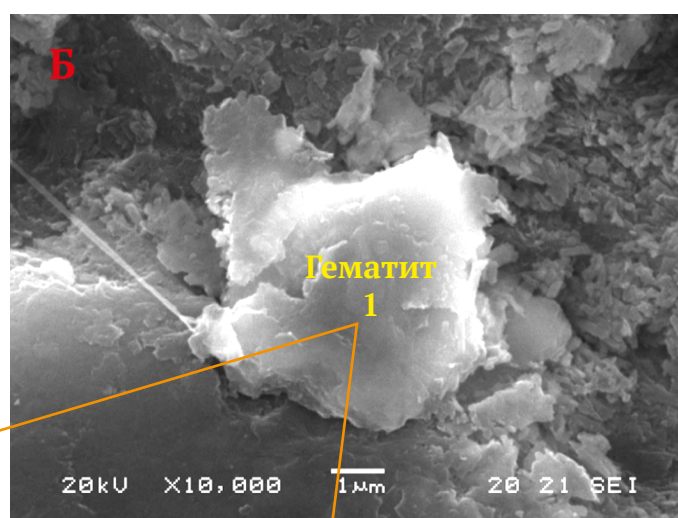


Рис. 3. Исследование тамазертского каолина методами SEM-EDX



Расчет технологических показателей

Каждый продукт разделения может быть охарактеризован качественными и количественными показателями. По этой причине использовалось несколько уравнений [21]:

– уравнение материального баланса для продуктов разделения:

$$Q_f = Q_c + Q_t; \quad (1)$$

– уравнение баланса для выходов, %:

$$\gamma_f = \gamma_c + \gamma_t; \quad (2)$$

– выход концентрата, %:

$$\gamma_c = \frac{Q_c}{Q_f} \cdot 100; \quad (3)$$

– выход хвостов, %:

$$\gamma_t = \frac{Q_t}{Q_f} \cdot 100, \quad (4)$$

где Q_f – масса продукта разделения, т; Q_c – масса концентрата, т; Q_t – масса хвостов, т; γ_f – выход продукта разделения, %; γ_c – выход концентрата, %; γ_t – выход хвостов, %.

Тамазертский каолин демонстрирует хорошие показатели флотиремости. Выходы и содержания концентратов и хвостов тамазертского каолина после процесса флотации показаны на рис. 5 и 6. Оптимальный уровень выхода достигается по фракции от 20 до 40 мкм – 79,84 и 19,92 % по весу для концентрата и хвостов соответственно.

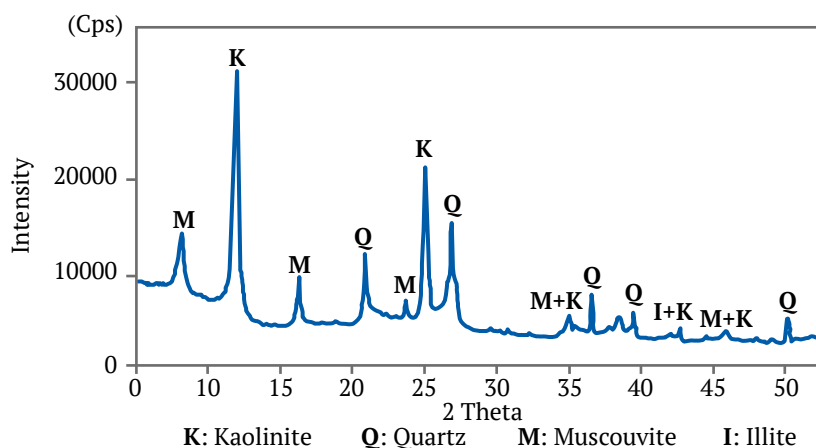


Рис. 4. Результаты рентгенофазового анализа тамазертского каолина

Таблица 3

Материальный баланс и результаты флотационных испытаний

№ испытания	1		2		3		4		5	
Фракция, мкм	0–20		20–40		40–80		80–100		100–120	
Материальный баланс, г	Q_{c1}	Q_{t1}	Q_{c2}	Q_{t2}	Q_{c3}	Q_{t3}	Q_{c4}	Q_{t4}	Q_{c5}	Q_{t5}
	190,5	58,9	199,6	49,8	185,6	63,7	162,5	85,7	148,6	100,5
Q_f , г	249,4		249,6		249,5		249,2		249,5	
Выход, %	γ_{c1}	γ_{t1}	γ_{c2}	γ_{t2}	γ_{c3}	γ_{t3}	γ_{c4}	γ_{t4}	γ_{c5}	γ_{t5}
	76,25	23,30	79,84	19,92	74,24	25,26	65	34,28	59,44	40,20

Таблица 4

Химический анализ концентратов тамазертских каолинов

Фракция, мкм	Оксид, вес. %											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	ППП (LOI)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
0–20	49,13	38,81	0,15	0,05	0,10	0,06	0,07	1,05	00	00	10,58	1,26
20–40	49,38	38,97	0,08	0,04	0,11	0,06	0,09	1,11	00	00	10,19	1,27
40–80	48,95	38,79	0,13	0,09	0,12	0,08	0,11	1,23	00	00	10,42	1,26
80–100	48,14	36,85	0,19	0,12	0,15	0,10	0,12	1,28	00	00	12,98	1,30
100–120	47,31	36,72	0,28	0,20	0,19	0,10	0,16	1,41	00	00	13,59	1,29



Из табл. 3, рис. 5 и 6 видно, что в целом выход концентрата снижается с ростом размера частиц (строго говоря, начиная с фракции 20–40 мкм, но различия выходов во фракциях 0–20 мкм и 20–40 мкм статистически незначимы). Это связано с тем, что мелкие частицы (каолинита) более подвержены извлечению в пенный продукт при пенной флотации. По общему мнению, эффективность флотационного разделения минералов снижается с увеличением размера частиц [22].

Содержание K_2O снизилось с 2,58 до 1,05 вес. % во фракции < 20 мкм, что свидетельствует о значительном удалении иллита и/или мусковита.

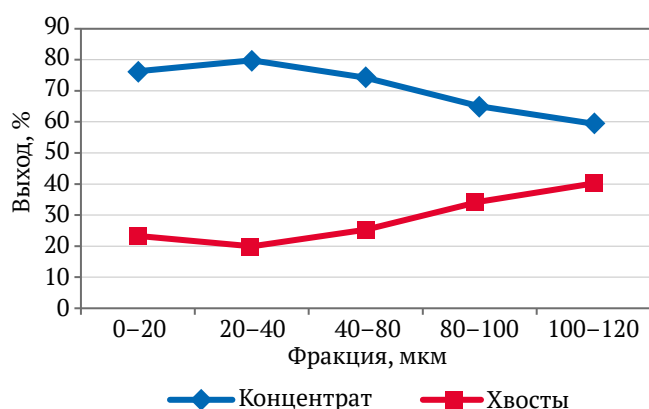


Рис. 5. Выход концентратов и хвостов тамазертского каолина (ТК) при процессе флотации

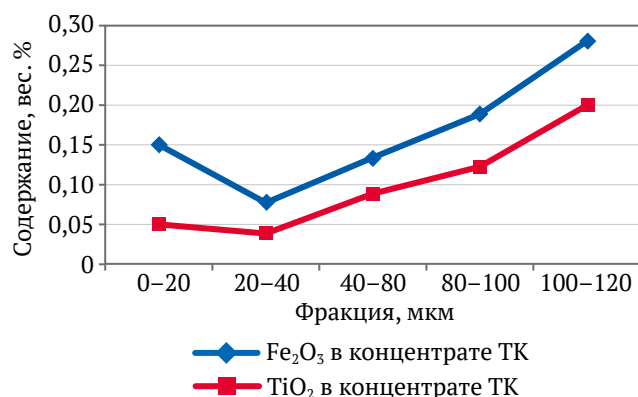


Рис. 6. Содержания Fe_2O_3 и TiO_2 в концентрате тамазертского каолина после процесса флотации

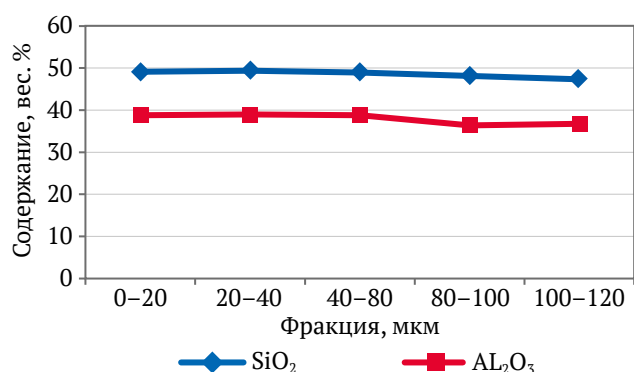


Рис. 7. Содержания Al_2O_3 и SiO_2 в концентрате тамазертского каолина после флотационной обработки

Результаты химических исследований (см. табл. 2 и 4, рис. 7) показывают, что содержания SiO_2 и Al_2O_3 во фракции 20–40 мкм анализируемой пробы увеличились с 46,70 до 49,38 вес. % и с 36,67 до 38,97 вес. % соответственно. По всей видимости, это свидетельствует об увеличении содержания каолинита; соответственно, белизна полученного продукта также повысится (по сравнению с исходным каолином).

Все анализы показывают, что существенное влияние на обогащение тамазертского каолина оказывают размеры частиц, причем оптимальный размер находится в интервале от 0 до 40 мкм.

Сравнение химического анализа идеального и грузинского каолинов (KGa-1b) и химического анализа тамазертского каолина после флотационного обогащения позволяет утверждать, что флотационное обогащение дает вполне удовлетворительные результаты.

Заключение

Чаще всего примеси Fe_2O_3 и TiO_2 вызывают окрашивание каолина и снижают его товарную ценность и промышленное использование. На пробе тамазертского каолина, полученной методом пенной флотации, было проведено несколько испытаний на достижение соответствия промышленным требованиям.

Химический анализ показал, что тамазертский каолин представлен алюмосиликатами с содержанием 46,70 % SiO_2 и 36,67 % Al_2O_3 . Примеси Fe_2O_3 и TiO_2 в количестве 2,7 % и 0,28 % соответственно придают тамазертскому каолину коричневатую окраску (низкое качество), и такой каолин не подходит для многих отраслей промышленности.

Результаты, полученные при применении пенной флотации, весьма обнадеживают – после обогащения проб содержания оксидов железа и титана (основные окрашивающие примеси в тамазертском каолине (во фракции 20–40 мкм)) снизились с 2,7 до 0,08 вес. % Fe_2O_3 и с 0,28 до 0,04 вес. % TiO_2 (в оптимальном испытании). Эти результаты подтверждают, что железо не является изоморфной примесью в структуре каолинита и находится в свободном состоянии.

Содержания SiO_2 и Al_2O_3 после пенной флотации в анализируемых пробах (во фракции 20–40 мкм) увеличились с 46,70 до 49,38 вес. % и с 36,67 до 38,97 вес. % соответственно. По всей видимости, это свидетельствует об увеличении содержания каолинита; соответственно, с ростом содержания каолинита белизна полученного продукта также повышается (по сравнению с исходным каолином).

Кроме того, данное исследование показало важность размера частиц подвергаемой флотации пробы, который оказывает существенное влияние на эффективность обогащения тамазертского каолина методом пенной флотации. Наилучшие результаты были получены во фракции от 0 до 40 мкм.

Сравнение химического состава грузинского каолина (KGa-1b), идеального каолинита и обогащенного тамазертского каолина подтвердило, что процесс пенной флотации может быть потенциально эффективным способом улучшения качества каолиновой руды Тамазерта путем удаления Fe_2O_3 и TiO_2 с получением удовлетворительных результатов.



Список литературы / References

1. Bundy W.M. The diverse industrial applications of kaolin. In: Murray H.H., Bundy W., Harvey C. (Eds.) *Kaolin, Genesis and Utilization*. Special Publication 1. Boulder, Colorado: The Clay Mineral Society; 1993. Pp. 43–73.
2. Murray H.H., Keller W. Kaolins, kaolins, and kaolins. In: Murray H. H., Bundy W., Harvey C. (Eds.) *Kaolin, Genesis and Utilization*. Special Publication 1. Boulder, Colorado: The Clay Mineral Society; 1993. Pp. 1–24.
3. Muller J.P., Calas G. Genetic significance of paramagnetic centers in kaolinites. In: Murray H.H., Bundy W., Harvey C. (Eds.) *Kaolin, Genesis and Utilization*. Special Publication 1. Boulder, Colorado: The Clay Mineral Society; 1993. Pp. 261–290.
4. Clozel B., Allard T., Muller J.P. Nature and stability of radiation-induced defects in natural kaolinites: new results and a reappraisal of published works. *Clays and Clay Minerals*. 1994;42:657–666. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1994.0420601>
5. Grimshaw R.W. *The chemistry and physics of clays and other ceramic materials*. 4th ed. London: Ernest Benn; 1971.
6. Grim R.E. *Clay mineralogy*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Company, International Series in the Earth and Planetary Sciences; 1968. P. 596.
7. Wills B.A., Finch J. *Wills' mineral processing technology. An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 8th ed. Butterworth-Heinemann; 2015. Pp. 266–268.
8. Rousseau R.W. *Handbook of separation process technology*. NY, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 1987. 775 p.
9. Tao D. Role of bubble size in flotation of coarse and fine particles – A review. *Separation, Science and Technology*. 2005;39(4):741–760. <https://doi.org/10.1081/SS-120028444>
10. Blazy P. *La valorisation des minerais*. Presses Universitaires de France; 1970. 415 p. (In French)
11. Zhengchang Sh. *Principles and Technologies of Flotation Machines*. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy (BGRIMM), Beijing, China; 2021. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0332-7>
12. Young R.H., Morris H.H. *Method of treating clay to improve its whiteness*. U.S Patent. 1985. No. 4,492,628.
13. Öster R., Schreck B., Rybinski W., Dobiás B. New reagent systems for the flotation of kaolinite. *Minerals Engineering*. 1992;5(3–5):445–456.
14. Yoon R.H., Nagaraj D.R., Wang S.S., Hildebrand T.M. Benefication of kaolin clay by froth flotation using hydroxamate collectors. *Minerals Engineering*. 1992;5(3–5):457–467.
15. Murray H.H. Major Kaolin Processing Developments. *International Journal of Mineral Processing*. 1980;7:263–274.
16. Fuerstenau M.C., Miller J.D., Kuhn M.C. *Chemistry of flotation*. New York: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc.; 1985. P. 132.
17. Köster R., Schreck B., von Rybinski W., Dobias B. New reagent systems for the flotation of kaolinite. *Minerals Engineering*. 1992;5(3–5):445–56. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(92\)90224-W](https://doi.org/10.1016/0892-6875(92)90224-W)
18. Jiang H., Sun Z., Xu L., Hu Y., Huang K., Zhu S. A comparison study of the flotation and adsorption behaviors of diasporite and kaolinite with quaternary ammonium collectors. *Minerals Engineering*. 2014;65:124–129. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.023>
19. Castelein O. *Influence de la vitesse de traitement thermique sur le comportement du kaolin bio: application au frittage rapide*. Thèse de doctorat de l'université de Limoges. 2000. (In French)
20. Amigo J.M., Bastida M., Sanz J. et al. Crystallinity of Lower Cretaceous kaolinites of Teruel (Spain). *Applied Clay Science*. 1994;9:51–69. [https://doi.org/10.1016/0169-1317\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0169-1317(94)90014-0)
21. Pilov P.I., Petrova O.V. *Procédés et machines de traitement des minéraux utiles*. Le manuel. Université Nationale des Mines; 2013.
22. Trahar W.J., Warren L.J. The floatability of very fine particles – A review. *International Journal of Mineral Processing*. 1976;3:103–131. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(76\)90029-6](https://doi.org/10.1016/0301-7516(76)90029-6)

Информация об авторе

Мохаммед Лараба – доктор наук, преподаватель, кафедра горного дела и геотехнологии, Институт горного дела, Университет Эхахида Шейха Ларби Тебесси, г. Тебесса, Алжир; ORCID [0000-0003-1479-7092](https://orcid.org/0000-0003-1479-7092), Scopus ID [14034384200](https://scopus.org/14034384200), ResearcherID [M-9255-2018](https://orcid.org/M-9255-2018); e-mail larabamd@univ-tebessa.dz

Information about the author

Mohammed Laraba – Dr. Sci., Lecturer, Department of Mines & Geotechnology, Institute of Mining, Echahid Cheikh Larbi Tebessi University, Tébessa, Algeria; ORCID [0000-0003-1479-7092](https://orcid.org/0000-0003-1479-7092), Scopus ID [14034384200](https://scopus.org/14034384200), ResearcherID [M-9255-2018](https://orcid.org/M-9255-2018); e-mail larabamd@univ-tebessa.dz

Поступила в редакцию

14.04.2023

Received

14.04.2023

Поступила после рецензирования

19.05.2023

Revised

19.05.2023

Принята к публикации

30.05.2023

Accepted

30.05.2023



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-73>

УДК 502.132



Формирование противозерозийного растительного покрова на песчаном карьере в условиях Арктики с помощью осадка сточных вод

А. В. Лусис^{1,2} , Л. А. Иванова^{2,3} , Т. Т. Горбачева³ ,

А. В. Румянцева⁴

¹ ГК «Эвобласт», г. Москва, Российская Федерация

² Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ПАБСИ КНЦ РАН), г. Кировск, Российская Федерация

³ Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН), г. Апатиты, Российская Федерация

⁴ Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Российская Федерация

adelisrab@gmail.com

Аннотация

В настоящей работе представлены результаты многолетних полевых исследований по оценке возможности применения ОСВ регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства для ускоренного формирования устойчивого противозерозийного растительного покрова на песчаных карьерах в Арктической зоне РФ с подтверждением оказания им стимулирующего эффекта на прорастание семян, дальнейший рост и развитие растений. Показано, что ОСВ может применяться двумя способами: нанесением на поверхность грунта сплошным слоем высотой от 5 до 10 см, и фрагментарно – слоем 2–3 см, а подзимний посев семян – непосредственно по поверхности грунта (под слой ОСВ) либо поверх осадка сточных вод. В обоих случаях отмечено ежегодное улучшение качественных и количественных показателей искусственно созданного травостоя – многократное, по сравнению с контролем, увеличение его высоты и плотности, биомассы, проективного покрытия и мощности сформированной дернины. Исследованы особенности формирования флористического состава созданных в песчаном карьере фитоценозов. Установлено, что независимо от количества и способа нанесения применение ОСВ способствует ускорению восстановительной сукцессии на песчаном карьере, а мощный травостой опытных вариантов путем привлечения пионерной растительности – усложнению его структуры и видового состава, быстрому зарастанию внутренних оголенных участков и возникновению элементов естественных фитоценозов, свойственных зональному типу растительности, а также стабилизации процессов эрозии на объекте исследования. Все это позволяет характеризовать сформированное в эксперименте с помощью ОСВ растительное сообщество как экологически устойчивое, имеющее перспективы к самостоятельному существованию и дальнейшему развитию. Результаты таких исследований могут послужить основой для организации мониторинга и разработки мероприятий по оптимизации растительности подобных экотопов.

Ключевые слова

песчаный карьер, фиторекультивация, осадок сточных вод (ОСВ), мелиорант, травосмесь, растительный покров

Благодарности

Проведенные исследования были поддержаны грантом РФФИ и Министерства образования и науки Мурманской области. Проект 17-45-510205: «Дефосфотация коммунальных стоков в условиях снижения водопотребления» в 2017–2019 гг.

Для цитирования

Lusis A.V., Ivanova L.A., Gorbachyova T.T., Rumyantseva A.V. Establishment of an erosion-control plant cover in a sand pit under Arctic conditions using sewage sludge. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):223–231. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-73>



SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Research paper

Establishment of an erosion-control plant cover in a sand pit under Arctic conditions using sewage sludgeA. V. Lusic^{1,2}  , L. A. Ivanova^{2,3} , T. T. Gorbachyova³  ,A. V. Rumyantseva⁴ ¹ SC Evoblast, Moscow, Russian Federation² Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of N.A. Avrorin, KSC RAS, Kirovsk, Russian Federation³ Institute of North Industrial Ecology Problems, KSC RAS, Apatity, Russian Federation⁴ Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation adelisrab@gmail.com**Abstract**

This paper presents the findings of a prolonged field studies that aimed to assess the feasibility of using the sewage sludges (SS) from a regional water and wastewater services enterprise to expedite the establishment of a resilient erosion-control plant cover in sand pits located in the Arctic region of the Russian Federation. The study confirms the beneficial impact of the SS on the seed germination, subsequent growth, and development of plants. The study shows that SS can be used in two ways: first, by applying a continuous layer measuring 5 to 10 cm thick on the soil surface or by fragmentarily applying a layer 2–3 cm thick. Second, through early-winter sowing of seeds directly on the soil surface (under the SS layer) or on top of the sewage sludge. In both cases, an annual enhancement of the qualitative and quantitative parameters of the artificially formed stand of grass was observed. This included a significant increase in its height and density, biomass, foliage cover, and thickness of the formed sod, in contrast to the reference sample. The present study investigates the characteristics of the floristic composition of the phytocenoses formed in a sand pit. The findings demonstrate that the use of sewage sludge (SS), regardless of the quantity and application method, accelerates the restorative succession in the sand pit. The thick stand in the experimental variants, resulting from the attraction of pioneer vegetation, promotes the complexity of its structure and species composition, rapid vegetation of inner bare areas, and the emergence of natural phytocenoses elements that are specific to the zonal type of vegetation. Additionally, the use of SS stabilizes erosion processes in the study area. Consequently, the plant community formed in the experiment using SS can be classified as ecologically sustainable, with the potential for independent existence and further development. These results can serve as a foundation for monitoring efforts and the development of measures to optimize the vegetation of such ecotopes.

Keywords

sand pit, phytoremediation, sewage sludge (SS), ameliorant, grass mixture, plant cover

Acknowledgements

This research received funding from the Russian Foundation for Basic Research and the Ministry of Education and Science of the Murmansk Region. The project, titled “Dephosphorization of municipal wastewater under the conditions of reduced water consumption” (Project 17-45-510205), was conducted between 2017 and 2019.

For citation

Lusic A.V., Ivanova L.A., Gorbachyova T.T., Rumyantseva A.V. Establishment of an erosion-control plant cover in a sand pit under Arctic conditions using sewage sludge. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):223–231. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-73>

Введение

Ежегодное увеличение масштабов использования минеральных ресурсов, осуществление геологоразведочных и строительных работ горнорудными и нефте-, газодобывающими предприятиями, прокладка дорог, линий электропередач и других приводят к нарушению природных экосистем (уничтожению почв, растительного покрова, уменьшению биоразнообразия) и возникновению новых техногенных форм ландшафта [1].

На территории Мурманской области карьеры, возникающие после изъятия песка для строитель-

ных и иных целей, являются одной из часто встречающихся форм техногенного изменения арктических ландшафтов. Для их восстановления необходимы мероприятия, направленные на преобразование нарушенных земель в состояние, пригодное для дальнейшего использования, и предотвращение отрицательного воздействия на окружающую среду [2].

Одним из способов экологической реабилитации депрессивных территорий является отведение их части под самозарастание [3]. Однако в связи с неблагоприятным прогнозом естественного зарастания и сложностью восстановления растительного покрова



на песчаных отложениях, обусловленных индивидуальной и региональной спецификой, на первый план выдвигается проведение рекультивационных работ (восстановление продуктивности нарушенных земель путем создания новых, целенаправленно синтезируемых, искусственных биогеоценозов) [4]¹.

При принятии рекультивационных мер по формированию растительного покрова на песчаном грунте одним из определяющих факторов является питательный режим его поверхностного слоя. Бесструктурность такого субстрата, низкая водоудерживающая способность, отсутствие в нем органического вещества биогенного происхождения (гумуса), а также недостаточная обеспеченность питательными веществами – вот причины неизбежности ежегодных инвестиций в дорогостоящие минеральные удобрения [5]. Положительную роль в решении проблемы низкого НРК-статуса песчаных грунтов, создания на них и поддержания устойчивости растительного покрова может сыграть использование мелиоранта на основе продуктов переработки региональных коммунальных сточных вод – осадка сточных вод (ОСВ) [6–8]. Он обладает потенциально полезными свойствами вследствие высокого содержания легкодоступного для микробиоты органического вещества [9], а также лабильности азота, фосфора и калия, обуславливающей их быструю ассимиляцию растениями [10, 11]. ОСВ оказывает положительное воздействие на физические свойства песчаных почв (оптимизирует плотность и агрегированность), однако может содержать набор тяжелых металлов и патогенов, поэтому необходимы исследования каждого осадка в конкретных условиях рекультивируемых территорий [12].

Цель исследования – оценка возможности применения ОСВ местного предприятия водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) АО «Апатитыводоканал» для ускоренного формирования высококачественного противозерозионного растительного покрова на песчаных карьерах в арктической зоне РФ.

Задачи исследования:

1. Изучить влияние ОСВ на рост растений и качество искусственно создаваемых посевных фитоценозов.
2. Апробировать способы нанесения ОСВ на поверхность грунта песчаного карьера при проведении рекультивационных мероприятий.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены в период с 07.10.2017 по 10.10.2020 г. в Мурманской области (РФ, Кольский полуостров) на локальной нарушенной территории – песчаном карьере АО «Апатитыводоканал» по добыче строительных материалов, глубина которого варьирует от 3 до 5 м.

Район, в котором находится объект исследования, относится к подзоне северотаежных хвойных лесов,

их флористическая насыщенность сосудистыми растениями составляет около 250 видов [13]. По результатам исследований модельный участок представлял собой вторичный экотоп, содержащий в поверхностном слое грунта незначительное количество зачатков растений. Анализ состава растительных сообществ, произрастающих в карьере, выявил наличие в нем небольших микрогруппировок из одно-, дву- и многолетних пионерных видов растений с небольшой степенью покрытия его поверхности данной растительностью. Растительный покров вокруг карьера представлен естественными лесными сообществами, главным образом березняками, лишайниково-разнотравными и лишайниково-травянисто-моховыми ельниками, на открытых участках – луговыми растениями. В общей сложности непосредственно на территории карьера и в ближайших окрестностях было зафиксировано 56 видов, характерных для сухих и бедных почв. При благоприятных условиях произрастания они могли бы участвовать в естественном зарастании карьерного пескогрунта, повышении биоразнообразия рекультивируемой территории. Это способствовало бы формированию значительно более устойчивого искусственного фитоценоза [14].

В карьере видны следы деятельности ветровой и водной эрозии (сползание грунта, округлость вершин холмов). Модельный участок представлял собой песчаный склон (уклон 30°) северо-западной экспозиции площадью 200 м², свободный от растительности, с предварительно проведенным на нем выполаживанием, террасированием и планировкой поверхности².

Объектом исследований являлся песчаный карьерный грунт с примесью гравия и небольших валунов. Согласно Государственному стандарту 25100–2011³ по крупности зерна он относится к среднеразмерной разновидности с содержанием незначительной доли глинистых частиц.

В качестве мелиоранта для повышения биогенности данного грунта использовался осадок сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС-3) г. Апатиты (Мурманская область), представляющий собой увлажненную пластилинообразную массу черно-коричневого цвета с резким специфическим запахом. Основным способом обработки ОСВ на данных очистных сооружениях является его подсушка и выдержка на иловых площадках в течение трех и более лет. Контрольный образец ОСВ относится к отходам V класса опасности и полностью соответствует требованиям ГОСТ Р 54534–2011⁴, предъявляемым к ОСВ при использовании в качестве почвогрунта для биологической рекультивации. Валовое содержание

² ГОСТ 17.5.3.04–83 (СТ СЭВ 5302–85). Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель. М.: Стандартинформ; 1984.

³ ГОСТ 25100–2011. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. 2013-01-01. М.: Стандартинформ; 2011.

⁴ ГОСТ Р 54534–2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель (издание официальное). М.: Стандартинформ; 2012.

¹ ГОСТ Р 57446–2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. М.: Стандартинформ; 2017.



тяжелых металлов в ОСВ значительно ниже нормативов [12], установленных ГОСТ Р 54534–2011⁵.

Схема полевого опыта включала 3 варианта, каждый выполнялся в 6 повторностях. С этой целью на модельном участке было заложено 18 экспериментальных делянок, каждая размером 1×1 м, расположенных через 0,5 м друг от друга. Нанесение ОСВ на поверхность грунта в опытных вариантах производилось двумя способами: фрагментарно и сплошным слоем, в контроле ОСВ не вносили. Особенности схемы полевого опыта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Схема полевого опыта

Вариант	Способ нанесения ОСВ
1 – опытный (n = 6)	Фрагментарно слоем высотой 2–3 см с посевом семян по поверхности грунта (под слой ОСВ)
2 – опытный (n = 6)	Сплошным слоем высотой 5–10 см с посевом семян поверх слоя ОСВ
3 – контрольный (n = 6)	Без использования ОСВ с посевом семян по поверхности грунта

Покрытие песчаной поверхности плодородным слоем почвы и дополнительная подкормка растений минеральными удобрениями в ходе эксперимента не проводились.

Сложный посевной фитоценоз формировался с помощью подзимнего способа прямого посева травосмеси, разработанной нами на основании биологических характеристик видов многолетних травянистых растений. Она включала 3 вида злаков – овсяницу красную (*Festuca rubra* L.), волоснец песчаный (*Leymus arenarius* Hochst.), пырей ползучий (*Elymus repens* (L.) Gould) – и 2 вида бобовых растений – люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* Lindl.), копеечник альпийский (*Hedysarum alpinum* L.), взятые в соотношении 5 : 1 : 1 : 0,1 : 0,1 (по объему). Норма высева семян составляла 27,5 г/м². В опытном варианте №1 семена высевались непосредственно на поверхность грунта (под слой ОСВ), в варианте №2 – поверх сплошного слоя ОСВ. Отдельно от травосмеси в нижний правый угол каждой делянки высевали по 6 штук семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Дальнейшие полевые работы включали в себя регулярные наблюдения за ростом и развитием растений, формированием травостоя. Влияние мелиоранта на качество создаваемых фитоценозов оценивалось по высоте растений в травостое (см), проективному покрытию (%) на делянках, изменению структуры и видового состава фитоценоза [15, 16] и – в завершение эксперимента – по мощности дернины (см), плотности травостоя (количество побегов на 1 м²) и накоплению сырой биомассы (г/м²). Измерения биометрических показателей проводили одновременно во всех повторностях, определение биомассы – в лабораторных условиях с использованием аналитических весов.

Латинские названия растений приводятся в соответствии с общепринятыми международными названиями World Flora Online⁶.

Для обработки полученных данных применяли однофакторный дисперсионный анализ (one-way ANOVA) в Excel.

Результаты исследований

2018 г. Появление первых всходов посеянных растений в эксперименте было зафиксировано во всех трех вариантах одновременно сразу после схода снежного покрова в мае 2018 г. Однако самые дружные и качественные всходы отмечены в вариантах с использованием ОСВ (табл. 2), что позволило предполагать стимулирующее действие указанного мелиоранта на процесс прорастания семян.

В течение последующих 1,5 мес на экспериментальных площадках сформировались примитивные (одноярусные) растительные сообщества (табл. 2), на июль 2018 г. состоящие только из двух посеянных видов – овсяницы красной и пырея ползучего. Качество травостоя на опытных делянках сильно отличалось от контрольных. В обоих опытных вариантах это был густой, хорошо развитый травостой яркого изумрудно-зеленого цвета с высоким проективным покрытием. На делянках со сплошным нанесением ОСВ и верховым посевом травосмеси (вариант 2) оно составило 100 %, с фрагментарным (вариант 1) – 87 %, во втором случае прорастание семян наблюдалось главным образом на свободных от слоя ОСВ участках опытных делянок, и в меньшей степени – на участках, покрытых слоем мелиоранта. В контроле (без внесения ОСВ) сформированный травостой был разреженным желто-красного цвета, покрывающим всего 15 % площади делянки. Растения в нем находились в угнетенном состоянии и к завершению вегетационного сезона практически не прибавили в высоту.

В первый вегетационный период увеличение (до пяти видов) состава сформированных фитоценозов отмечалось только на опытных делянках (табл. 2) за счет вселения с близлежащих территорий трех новых видов. Это аборигенные пионерные и сорные растения – мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), иван-чай узколистный (*Epilobium angustifolium* L.) и щавель малый (*Rumex acetosella* L.).

В **2019 г.** на контрольных площадках травостой по-прежнему оставался низким, разреженным (проективное покрытие составляло всего 20 %), а образовавшееся сообщество осталось одноярусным (табл. 2, рис. 1). Опытные делянки отличались плотным травостоем сложного двоярусного строения высотой, в 4–5 раз превышающей высоту растения в контроле.

Растения на контрольных площадках только вегетировали, а на опытных – находились в фазе цветения. Все шесть посеянных видов, включая сеянцы сосны обыкновенной, были зафиксированы только на опытных делянках. В этот период видовой состав созданного растительного сообщества пополнили

⁵ ГОСТ Р 54534–2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель. М.: Стандартинформ; 2013.

⁶ The WFO Plant List. Snapshots of the taxonomy. URL: <https://wfo.plantlist.org/plant-list>

четыре вида из основной посевной травосмеси – волоснец песчаный (*Leymus arenarius* Hochst.), люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* Lindl.), копеечник альпийский (*Hedysarum alpinum* L.) и сосна обыкновенная, продолжилось заселение опытных делянок, а также их периметра шестью новыми видами аборигенных растений – астрагалом субарктическим (*Astragalus norvegicus* Grauer), щучкой дернистой (*Deschampsia caespitosa* (L.) P. Beauv.), жерушником болотным (*Rorippa palustris* Besser), кульбабой осенней (*Scorzoneroide autumnalis* (L.) Moench), полевицей тонкой (*Agrostis capillaris* L.), кисличником двупестичным (*Oxyria digyna* Hill.). На контрольных площадках, чаще всего в травостое, не удавалось обнаружить волоснец песчаный и сосну обыкновенную, что может быть обусловлено качеством собранных в природных условиях семян и их незначительной объемной долей при посадке. Несмотря на то что люпин многолистный приурочен к местообитаниям с песчаными почвами и вполне может развиваться на бедных питательными веществами субстратах [17], данный вид зафиксирован только на опытных делянках, где присутствовал осадок сточных вод.

2020 г. За три вегетационных периода благодаря применению ОСВ на лишенном растительного и почвенного покрова модельном откосе карьера, без землевания и использования удобрений были сформированы сообщества растений, обладающих интенсивным ростом и развитием, в которых по-прежнему доминировали два, определяющих их высоту, вида: овсяница красная и пырей ползучий.

У растений опытных вариантов она достигла $95,2 \pm 1,4$ см (вариант 2) и $86,7 \pm 3,3$ (вариант 1), в контроле данный показатель был в 6 раз меньше (табл. 3). В отличие от контроля, растения опытного варианта по-прежнему сохраняли красивый интенсивно зеленый цвет и блестящую поверхность листьев и стеблей. Плотность травостоя в опытных вариантах превосходила контроль в 1,7–4,4 раза. 100%-ное проективное покрытие делянок было отмечено только в опытных вариантах. На контрольных делянках этот показатель составил всего 10 %, это ниже, чем в первый и второй вегетационные периоды на 5–10 %. Корни растений в опытных вариантах хорошо освоили песчаный субстрат и сформировали плотную травяную дернину мощностью $3,6 \pm 0,03$ см (вариант 1)

Таблица 2

Средние показатели искусственного фитоценоза в 2018–2019 гг. в песчаном карьере АО «Апатитыводоканал»

Показатель	Вариант и способ нанесения ОСВ					
	2018 г.			2019 г.		
	1*	2**	3 (контроль)	1*	2**	3 (контроль)
Количество ярусов, шт.	1	1	1	2	2	1
Средняя высота растений (по виду-доминанту), см	$27,4 \pm 1,5$	$35,3 \pm 1,2$	$8,1 \pm 0,3$	$56,9 \pm 1,7$	$69,7 \pm 1,9$	$12,8 \pm 0,5$
Среднее количество видов из числа высеванных, шт.	2	2	2	4,5	5,6	4,0
Среднее количество вселившихся видов, шт.	3	3	–	3,8	3,8	2,3
Проективное покрытие, %	87	100	15	100	100	20

* – фрагментарное нанесение ОСВ;

** – нанесение ОСВ сплошным слоем.



Вариант 1



Вариант 2



Контрольный вариант

Рис. 1. Внешний вид опытных делянок в 2019 г.



и $9,6 \pm 0,02$ см (вариант 2). В контроле этот показатель был меньше в 1,4 и 3,7 раза соответственно (табл. 4). Высокое проективное покрытие и плотность травостоя в вариантах с применением ОСВ обусловили и существенное для северо-запада РФ накопление биомассы [18]. В опытном варианте 1 она составила $2952,0 \pm 52,5$ г/м², в варианте 2 – $5632,0 \pm 28,9$ г/м² (в пересчете 29 и 56,3 т/га), что в 29 и в 56 раз превысило данный показатель в контроле (всего $100,7 \pm 3,2$ г/м²) (1 т/га) (табл. 3).

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа влияния способа нанесения ОСВ на основные качественные показатели искусственного фитоценоза (2020 г.)

Вариант, источники вариации	Показатель		
	Высота растений (по виду-доминанту), см	Плотность травостоя, количество стеблей/1 м ²	Зелёная биомасса, г/м ²
1	$86,7 \pm 3,3$	$12\ 830 \pm 123,14$	$2952 \pm 52,5$
2	$95,2 \pm 1,4$	$32\ 589,7 \pm 546,7$	$5632 \pm 28,9$
3	$13,7 \pm 0,9$	$7431,7 \pm 20,9$	$100 \pm 3,2$
SS	120 538	2 105 022 787	76 295 880,9
df	2	2	2
MS	60 269	1 052 511 394	38 147 940,5
F	13 452,6	10 040	39 119,4
p-значение	< 0,001	< 0,001	< 0,001
F критическое*	7,4	3,7	3,9

* F критическое – табличное значение критерия принятого уровня – достоверность различий между вариантами принималась при значениях $p < 0,05$ ($n = 6$). Варианты считались недостоверными при значениях $p > 0,05$.

Таблица 4

Влияние способа нанесения ОСВ на качественные показатели искусственного фитоценоза (2020 г.)

Показатель	Вариант		
	1*	2**	3 (контроль)
Количество ярусов, шт.	2	3	1
Среднее количество видов из числа высеванных, шт.	6,0	6,0	4,5
Среднее количество вселившихся видов, шт.	11,7	12,0	3,0
Проективное покрытие, %	100	100	10
Мощность дернины (по керну, $n = 3$), см	$3,6 \pm 0,03$	$9,6 \pm 0,02$	$2,6 \pm 0,2$

* – фрагментарное нанесение ОСВ;

** – нанесение ОСВ сплошным слоем.

Исследование изменения основных качественных показателей созданного за три вегетационных периода растительного покрова под влиянием ОСВ (табл. 3) показало, что средние выборки для трех основных показателей качества искусственного фитоценоза статистически значимо отличаются ($p < 0,05$). Вычисленное для них F больше уровня значимости (F критическое), поэтому выдвинутая нами нулевая гипотеза, а именно – *высота, накопление зелёной биомассы растений и плотность травостоя не зависят от применения ОСВ* – была отклонена и принята альтернативная, согласно которой наше предположение о зависимости основных качественных показателей от применения ОСВ статистически обоснованно. Таким образом, с вероятностью 95% было доказано, что использование ОСВ оказало положительное влияние на качественные показатели созданного за три вегетационных периода растительного покрова на песчаном карьере.

Сформированный на опытных делянках плотный травостой имел сложное (дву- и трехъярусное) строение, в контроле он по-прежнему оставался примитивным, разреженным, одноярусным (табл. 4). В 2020 г. видовой состав созданных растительных сообществ пополнился еще двумя новыми видами аборигенных растений – ивой филиколистной (*Salix phylicifolia* L.), мятликом луговым (*Poa pratensis* L.), наблюдалось быстрое зарастание оголенных межделяночных участков и периметра площадок пионерными растениями, способствуя тем самым ускорению восстановительной сукцессии в карьере. Общее число видов (с учетом входящих в основной посевной состав) на модельном участке, адаптировавшихся к специфическим для них условиям, в 2020 г. увеличилось до 21, у семи из них наблюдался полный цикл развития. Отмеченное при этом возникновение элементов естественных фитоценозов, свойственных зональному типу растительного покрова, позволил характеризовать искусственно созданное растительное сообщество как экологически устойчивое, имеющее перспективы к самостоятельному существованию и дальнейшему развитию [19].

Практическое применение

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что на основании выполненных исследований впервые в природоохранных целях предложен инновационный, экономически более эффективный, по сравнению с традиционным, способ создания высококачественных реабилитационных фитоценозов.

Основанный на использовании широкодоступного и дешевого, являющегося к тому же дополнительным источником питательных веществ, влагоемкого компонента в виде продукта переработки региональных коммунальных сточных вод – ОСВ, он может сыграть положительную роль в решении проблемы низкой продуктивности песчаных техногрунтов. Предлагаемые в работе меры будут способствовать росту прибыли предприятий ВКХ за счет снижения штрафных санкций за сверхнормативный сброс отходов и возможно-



сти совершенствования технологических процессов, позволят вовлечь в хозяйственный оборот большой объем требующих утилизации отходов и тем самым добиться существенного снижения их негативного воздействия на окружающую среду. Получаемый при этом экономический эффект от защиты окружающей среды трудно поддается оценке [20, 21].

Направление дальнейших исследований

Полученные в исследованиях результаты требуют верификации при их внедрении на объектах накопленного экологического ущерба, в частности, для закрепления пылящих поверхностей разных типов хвостохранилищ на территории Мурманской области для признания предлагаемого способа альтернативой традиционным методам рекультивации техногрунтов.

Заключение

В многолетних полевых исследованиях сделана попытка разработки практических основ инновационного метода биорекультивации пескогрунтов без торфо- и землевания, дополнительного использования минеральных и органических удобрений.

Способ основан на натурных наблюдениях экспериментального орошения техногенного грунта песчаного карьера продуктом переработки региональных коммунальных сточных вод – ОСВ с подтверждением стимулирующего эффекта их использования на прорастание семян, дальнейший рост и развитие растений, улучшение качества искусственно создаваемых посевных фитоценозов, что может способствовать

частичному решению таких важных экологических проблем, как рациональное применение ОСВ региональных ВКХ для восстановления объектов накопленного экологического ущерба и улучшения окружающей среды на Крайнем Севере.

Показано, что ОСВ может применяться двумя способами – сплошным и фрагментарным нанесением на техногрунт слоем толщиной от 2 до 10 см, а подзимний посев семян – непосредственно по поверхности грунта (под слой ОСВ) либо поверх осадка.

Способ нанесения мелиоранта существенно влияет на качество формируемого посевного фитоценоза. Фрагментарное нанесение ОСВ на поверхность грунта способствует увеличению высоты растений в создаваемом фитоценозе в 6,3, плотности травостоя – в 1,7, биомассы – в 29,3, проективного покрытия – в 10 раз и мощности дернины в 1,4 раза по сравнению с контролем (вариант без внесения ОСВ). При нанесении осадка сплошным слоем данные показатели в сравнении с контролем еще больше возрастают: высота растений – в 6,9, плотность травостоя – в 4,4, биомасса – в 55,9, мощность дернины – в 3,7 раза.

Независимо от способа нанесения применение ОСВ способствует ускорению восстановительной сукцессии и увеличению биоразнообразия на песчаном карьере, а мощный травостой – заселению пионерных видов, быстрому зарастанию внутренних оголенных участков, возникновению элементов естественных фитоценозов, свойственных зональному типу растительности, закреплению, а также стабилизации процессов эрозии.

Список литературы

1. Капелькина Л.П. О естественном зарастании и рекультивации нарушенных земель Севера. *Успехи современного естествознания*. 2012;(11):98–102. URL: <https://s.natural-sciences.ru/pdf/2012/11-1/29.pdf>
2. Певзнер М.Е., Костовецкий В.П. *Экология горного производства*. М.: Недра; 1990. 235 с.
3. Кондратюк Е.Н., Тарабрин В.П., Бакланов В.И. и др. *Промышленная ботаника*. Киев: Наук. думка; 1980. 260 с.
4. Капелькина Л.П. *Экологические аспекты оптимизации техногенных ландшафтов*. М.: Наука; СПб.: ПРОПО; 1993. 191 с.
5. Евдокимова Г.А., Переверзев В.Н., Зенкова И.В. и др. *Эволюция техногенных ландшафтов (на примере отходов апатитовой промышленности)*. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН; 2010. 146 с.
6. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Смирнова И.Е. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской субарктике. *Почвоведение*. 2016;(11):1375–1391. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090082> (Перев. вер.: Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E. Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the kola subarctic. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(11):1294–1309. <https://doi.org/10.1134/S1064229316090088>)
7. Копчик Г.Н., Смирнова И.Е., Копчик С.В. и др. Эффективность ремедиации почв техногенных пустошей вблизи комбината «Североникель» на Кольском полуострове. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2015;(2):42–48.
8. Chen W., Wu L., Frankenberger W.T., Chang A.C. Soil enzyme activities of long term reclaimed wastewater-irrigated soils. *Journal of Environmental Quality*. 2008;37(5):36–42. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0315>
9. Kuypers M.M.M., Marchant H.K., Kartul B. The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Review Microbiology*. 2018;16:263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>
10. Jones D.L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant and Soil*. 1998;205:25–44. <https://doi.org/10.1023/A:1004356007312>
11. Горбачева Т.Т., Лусис А.В., Иванова Л.А. Химическая мелиорация нефелиновых песков с применением осадка сточных вод регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства. *Вестник МГТУ*. 2021;24(1):88–96. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-88-96>



12. Петрова Т.А., Рудзиш Э. Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов. *Записки Горного института*. 2021;251:767–776. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.16>
13. Раменская М.Л. *Анализ флоры Мурманской области*. Л: Наука; 1983. 216 с.
14. McGill B.J. Towards a unification of unified theories of biodiversity. *Ecology Letters*. 2010;13(5):627–642. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01449.x>
15. Лавренко Е.М., Корчагин А.А. (ред.). *Полевая геоботаника*. Т. 3. М.-Л.: Наука; 1964. 530 с.
16. Тиходеева М.Ю., Лебедева Т.Х. *Практическая геоботаника (анализ состава растительных сообществ)*. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та; 2015. 166 с.
17. Скворцов В.Э. *Атлас-определитель сосудистых растений таежной зоны Европейской России*. М.: Гринпис России; 2000. 587 с.
18. Вихман М.И., Кислых Е.Е., Лисенко Л.А. Урожайность и качество кормовых трав в зависимости от метеорологических факторов в условиях регулируемого плодородия почв. В: *Материалы 40-й Международной научной конференции «Агрохимические приёмы повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур в адаптивно-ландшафтных системах земледелия» ВНИИА им. Д. Н. Прянишникова*. М.: Изд-во ВНИИА; 2006. С. 127–129.
19. Третьякова А.С., Мухин В.А. *Синантропная флора Среднего Урала*. Екатеринбург; 2001. 147 с.
20. Harder R., Peters G.M., Svanström M., et al. Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modeling choices. *International Journal of Life Cycle Assess.* 2017;22(5):731–743. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1182-x>
21. Zema D.A., Bombino G., Andiloro S., Zimbone S.M. Irrigation of energy crops with urban wastewater: effects on biomass yields, soils and heating values. *Agricultural Water Management*. 2012;115:55–65. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.08.009>

References

1. Kapelkina L.P. Natural revegetation and remediation of disturbed lands of the north. *Advances in Current Natural Sciences*. 2012;(11):98–102. (In Russ.) URL: <https://s.natural-sciences.ru/pdf/2012/11-1/29.pdf>
2. Pevzner E.M., Kostovetsky V.P. *Ecology of mining*. Moscow: Nedra; 1990. 235 p. (In Russ.)
3. Kondratyuk E.N., Tarabrin V.P., Baklanov V.I., et al. *Industrial botany*. Kyiv: Naukova Dumka; 260 p. (In Russ.)
4. Kapelkina L.P. *Ecological aspects of optimization of man-made landscapes*. Moscow: Nauka; St. Petersburg: PROPO; 1993. 191 p. (In Russ.)
5. Evdokymova G.A., Pereverzev V.N., Zenkova I.V., et al. *Evolution of technogenic landscapes (on the example of waste from the apatite industry)*. Apatity: Publ. House of the Kola National Center of the Russian Academy of Sciences; 2010. 146 p. (In Russ.)
6. Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E. Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the kola subarctic. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(11):1294–1309. <https://doi.org/10.1134/S1064229316090088> (Orig. ver.: Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.E. Alternative technologies for remediation of technogenic barrens in the kola subarctic. *Pochvovedenie*. 2016;(11):1375–1391. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090082>)
7. Koptsik G.N., Smirnova I.E., Koptsik S.V., et al. Efficiency of remediation of technogenic barrens around the “Severonikel” works in the Kola peninsula. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2015;(2):42–48. (In Russ.)
8. Chen W., Wu L., Frankenberger W.T., Chang A.C. Soil enzyme activities of long term reclaimed wastewater irrigated soils. *Journal of Environmental Quality*. 2008;37(5):36–42. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0315>
9. Kuypers M.M.M., Marchant H.K., Kartul B. The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Review Microbiology*. 2018;16:263–276. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>
10. Jones D.L. Organic acids in the rhizosphere – a critical review. *Plant and Soil*. 1998;205:25–44. <https://doi.org/10.1023/A:1004356007312>
11. Gorbacheva T.T., Lusi A.V., Ivanova L.A. Chemical amelioration of nepheline sands using sewage sludge from a regional wastewater treatment plant. *Vestnik of MSTU*. 2021;24(1):88–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-88-96>
12. Petrova T.A., Rudzisha E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands. *Journal of Mining Institute*. 2021;251:767–776. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.16>
13. Ramenskaya M.L. *Analysis of the flora of the Murmansk region*. Leningrad: Nauka; 1983. 216 p.
14. McGill B.J. Towards a unification of unified theories of biodiversity. *Ecology Letters*. 2010;13(5):627–642. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01449.x>
15. Lavrenko E.M., Korchagin A.A. (eds.) *Field geobotany*. Moscow-Leningrad: Nauka Publ. House; 1964. 530 p. (In Russ.)



16. Tikhodeeva M. Yu., Lebedeva T. Kh. *Practical geobotany (analysis of the composition of plant communities)*. St. Petersburg: Saint Petersburg University Publ. House; 2015. 166 p. (In Russ.)
17. Skvortsov V. E. *Atlas-determiner of vascular plants of the taiga zone of European Russia*. Moscow: Greenpeace of Russia; 2000. 587 p. (In Russ.)
18. Vikhman M. I., Kislykh E. E., Liseenko L. A. Yield and quality of fodder grasses depending on meteorological factors under controlled soil fertility. In: *Proceedings of the 40th International Scientific Conference "Agrochemical Methods for Increasing Soil Fertility and Productivity of Agricultural Crops in Adaptive Landscape Farming Systems" of All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D. N. Pryanishnikov*. Moscow: Publishing house VNIIA; 2006. Pp. 127–129. (In Russ.)
19. Tretyakova A. S., Mukhyn V. A. *Synanthropic flora of the Middle Urals*. Yekaterinburg; 2001. 147 p. (In Russ.)
20. Harder R., Peters G. M., Svanström M., et al. Estimating human toxicity potential of land application of sewage sludge: the effect of modeling choices. *International Journal of Life Cycle Assess.* 2017;22(5):731–743. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1182-x>
21. Zema D. A., Bombino G., Andiloro S., Zimbone S. M. Irrigation of energy crops with urban wastewater: effects on biomass yields, soils and heating values. *Agricultural Water Management*. 2012;115:55–65. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.08.009>

Информация об авторах

Аделина Вадимовна Лусис – специалист, группа компаний «Эвобласт», г. Москва, Российская Федерация; специалист по охране труда, промышленной безопасности и охране окружающей среды, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ПАБСИ КНЦ РАН), г. Кировск, Российская Федерация; ORCID [0009-0004-0114-5372](https://orcid.org/0009-0004-0114-5372); e-mail adeliysrab@gmail.com

Любовь Андреевна Иванова – доктор биологических наук, заведующая лабораторией декоративного цветоводства и озеленения, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ПАБСИ КНЦ РАН), г. Кировск, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН), г. Апатиты, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7994-5431](https://orcid.org/0000-0002-7994-5431); e-mail ivanova_la@inbox.ru

Тамара Тимофеевна Горбачева – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН), г. Апатиты, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-5014-4385](https://orcid.org/0000-0001-5014-4385), Scopus ID [6602532642](https://orcid.org/6602532642); e-mail podzol_gorby@mail.ru

Анжелла Владимировна Румянцева – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии, Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7918-1857](https://orcid.org/0000-0002-7918-1857); e-mail a-v-rum@yandex.ru

Information about the authors

Adelina V. Lusis – Specialist, Evoblast Group, Moscow, Russian Federation; Leading Specialist in Labor Protection, Industrial Safety and Environmental Protection, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N. A. Avrorin of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kirovsk, Russian Federation; ORCID [0009-0004-0114-5372](https://orcid.org/0009-0004-0114-5372); e-mail adeliysrab@gmail.com

Lubov A. Ivanova – Dr. Sci. (Biol.), head of the laboratory of decorative floriculture and landscaping, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N. A. Avrorin of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kirovsk, Russian Federation; Leading Researcher, Institute for Problems of Industrial Ecology of the North of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7994-5431](https://orcid.org/0000-0002-7994-5431); e-mail ivanova_la@inbox.ru

Tamara T. Gorbacheva – Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Institute for Problems of Industrial Ecology of the North of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russian Federation; ORCID [0000-0001-5014-4385](https://orcid.org/0000-0001-5014-4385), Scopus ID [6602532642](https://orcid.org/6602532642); e-mail podzol_gorby@mail.ru

Anzhella V. Rumyantseva – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Department of Biology, Cherepovets State University, Cherepovets, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7918-1857](https://orcid.org/0000-0002-7918-1857); e-mail a-v-rum@yandex.ru

Поступила в редакцию

12.01.2023

Received

12.01.2023

Поступила после рецензирования

17.02.2023

Revised

17.02.2023

Принята к публикации

09.03.2023

Accepted

09.03.2023



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-03-100>

УДК 622:621.31

**Внутренний и перекрестный сопоставительный анализ потребления электроэнергии на угольных разрезах**С.А. Топно^{1,2} , Б.С. Умре² , М.В. Аваре² , Л.К. Саху¹ ¹ CSIR – Центральный институт горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива, Исследовательский центр Нагпура, г. Нагпур, Индия² Национальный институт технологии им. М. Висвесарая, г. Нагпур, Индия seematopno@rediffmail.com**Аннотация**

На угольных разрезах потребляется большое количество электроэнергии. Электрические экскаваторы, насосы и установки для перегрузки угля потребляют 75 % от общего объема электроэнергии. В данной работе представлена схема моделирования для проведения сопоставительного анализа (как внутреннего, так и перекрестного) потребления электроэнергии на предприятии. Для разработки модели сопоставительного анализа потребления электроэнергии на конкретном предприятии был применен статистический подход (метод линейной регрессии). Удельное потребление электроэнергии (УПЭ) используется в качестве контрольного показателя оценки энергоэффективности конкретного предприятия и нескольких угольных предприятий в Индии на основе полевых исследований. Также проведен сезонный анализ потребления электроэнергии. Согласно полученным результатам контрольный показатель УПЭ составляет 0,50 кВт-ч/т, а потенциал энергосбережения для одного предприятия – 10,7 %. Для нескольких угольных предприятий контрольный показатель УПЭ составляет 0,52 кВт-ч/т. Сделан вывод о том, что УПЭ в значительной степени зависит от производственной мощности, а разработанные метод и модель горных работ позволяют выполнить сопоставительный анализ и достичь эффективного энергопотребления на разрезах.

Ключевые слова

электрический, сопоставительный анализ, внутренний анализ, перекрестный анализ, удельное энергопотребление, потребление энергии, разрез

Благодарности

Авторы выражают благодарность директору Центрального института горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива за разрешение опубликовать данную работу. Авторы также выражают благодарность руководителю исследовательской группы и научным сотрудникам Исследовательского центра Нагпур Центрального института горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива (группа топливоведения) за оказанную поддержку. Мы искренне благодарны д-ру А.К. Сони, главному научному сотруднику Исследовательского центра Нагпур Центрального института горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива (группа геотехнологий), за ценные замечания и предложения по редактированию текста данной статьи. Мы также благодарим факультет электроники и информационных технологий и заведующего кафедрой электротехники Национального института технологии им. М. Висвесарая, все руководство предприятий SECL, BCCL и WCL, у которых были получены соответствующие данные в ходе исследований энергоэффективности и сопоставительного анализа.

Для цитирования

Topno S.A., Umre B.S., Aware M.V., Sahoo L.K. Internal and cross sectional benchmarking of electrical energy use in opencast coal mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):232–244. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-03-100>



POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Internal and cross sectional benchmarking of electrical energy use in opencast coal mine

S.A. Topno^{1,2}  , B.S. Umre²  , M.V. Aware²  , L.K. Sahoo¹  ¹ CSIR-Central Institute of Mining & Fuel Research, Nagpur Research Centre, Nagpur, India² Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur, India seematopno@rediffmail.com

Abstract

Electrical energy consumption in the opencast coal mine is very high. Electric shovels, pumps and coal handling plants consume 75% of the total electricity consumption of an opencast coal mine. In this paper, a modelling framework has been developed for electrical energy use benchmarking (internal as well as cross-sectional) of the mine. To develop a mine specific model for benchmarking electrical energy use statistical approach (linear regression method) has been applied. Specific power consumption (SPC) is used as a benchmarking index to assess the operating energy performance of a specific mine and multiple coal mines of India based on the field studies. Seasonal analysis of the electrical energy usage has also been analysed. Our results show the benchmark SPC as 0.50 kWh/t and the energy-saving potential as 10.7% for a single mine and the benchmark SPC of multiple coal mines as 0.52 kWh/t. The result concludes that SPC widely depends on its capacity and mining method and the developed model are useful for benchmarking and targeting for efficient electrical energy use in opencast mine.

Keywords

electrical, benchmarking, internal, cross sectional, specific power consumption, energy use, opencast mine

Acknowledgements

The authors duly acknowledge to the Director, CIMFR for permitting to publish this paper. The authors also extend their thanks to Head of the research group and other scientific staff of CSIR-CIMFR, Nagpur Research Centre (Fuel science group) for their support. We are extremely and sincerely thankful to Dr A.K. Soni, Chief Scientist, CSIR-CIMFR, Nagpur Research Centre (Mining technology group) for his valuable inputs and suggestions to improve the text and language content of this paper. Our thanks and acknowledgement are also due to the Department of Electronics and Information Technology and HOD, Electrical Department of VNIT; All mine authorities of SECL, BCCL and WCL mines from where relevant data have been collected during energy efficiency and benchmarking studies.

For citation

Topno S.A., Umre B.S., Aware M.V., Sahoo L.K. Internal and cross sectional benchmarking of electrical energy use in opencast coal mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):232–244. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-03-100>

Терминология

УПЭ	Удельное потребление электроэнергии, кВт-ч/т
УПЭ _к	Контрольный показатель УПЭ, кВт-ч/т
УПЭ _{к,п}	Контрольный показатель УПЭ предприятия, кВт-ч/т
УПЭ _{min}	Минимальное УПЭ, кВт-ч/т
$E_{п}$	Годовое потребление энергии, кВт-ч
E_c	Энергосберегающий потенциал, %
Q_t	Годовой общий объем производства, т/год
$Q_{уголь}$	Годовой общий объем производства угля, т/год
$Q_{вскр}$	Перегрузка вскрышных пород, т/год
$\rho_{вскр}$	Насыпная плотность вскрышных пород, т/м ³
$V_{вскр}$	Объем вскрышных пород, м ³ /год

Подстрочные и надстрочные индексы

a, e, p	Агрегат, оборудование, прогрессивный
i, j, k, r	Месяц, год, оборудование, предприятие

Список сокращений

Tr	Трансформатор
SECL	South Eastern Coalfields Ltd
BCCL	Bharat Coking Coal Limited
WCL	Western Coalfields Limited
CIMFR	Центральный институт горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива (Central Institute of Mining & Fuel Research)
CSIR	Совет научных и промышленных исследований (Council of Scientific and Industrial Research)



Введение

Добыча угля представляет собой энергоемкое производство на предприятии, ведущем открытую разработку. Добыча угля в Индии составляет 78 % от общего объема производства минерально-сырьевого сектора. В 2019–2020 гг. в Индии открытым и подземным способом было добыто 730,87 млн т угля¹. Около 94 % от общего объема добычи угля в Индии приходится на открытые горные работы². Наш анализ показал, что удельное потребление электроэнергии (УПЭ) для передовых практик открытых разработок с положительным градиентом в Индии составляет 123 МДж/т [1]. УПЭ трех крупных разрезов в Китае варьируется в пределах 90–225 МДж/т [2]. УПЭ семи канадских карьеров составляет от 97 до 256 МДж/т³. Потребление электроэнергии в горнодобывающей отрасли Индии равняется приблизительно 2,39 % от общего объема промышленного энергопотребления⁴, а горнодобывающей отрасли США – около 12 %⁵.

Поскольку энергопотребление на разрезах велико и включает в себя такие энергоемкие операции, как бурение, погрузку, транспортировку, откачку, перевалку угля и т.д., мониторинг и оценка энергопотребления имеют первостепенное значение. Сопоставительный анализ энергопотребления является мощным инструментом оценки энергоэффективности технологических процессов, установок, коммерческих зданий и т.д. Сопоставительный анализ (или перекрестный сопоставительный анализ) может быть проведен путем сравнения энергетических показателей аналогичных предприятий, включая передовой опыт в определенных отраслях. Проведение сопоставительного анализа также возможно на основе анализа временных рядов. Для проведения сопоставительного анализа энергопотребления в промышленных секторах Бойд с соавторами применяли статистический подход [3]. Кук и Рэндал использовали статистический метод для установления контрольного показателя энергопотребления путем расчета потребления и производства энергии [4]. Эти подходы определяются как «статистический сопоставительный анализ энергопотребления». Сопоставительный анализ энергопотребления на основе моделей для стекольной отрасли был рассмотрен в работе Сардешпанде и др. [5]. Биркенс и др. сравнивали удельное потребление электроэнергии стекловаренными печа-

ми с целью проведения сопоставительного анализа их энергоэффективности [6]. Тан и др. разработали методику проведения сопоставительного анализа энергоэффективности для обрабатывающей отрасли [7]. Внутренний сопоставительный анализ отрасли проводился с использованием линейного регрессионного анализа месячного энергопотребления и производства. Аналогичный сопоставительный анализ, основанный на передовых практиках в области энергоэффективности, был проведен для торговых центров в регионе побережья Персидского залива Джуайди и др. [8]. Приведенный выше анализ указывает на необходимость проведения внутреннего сопоставительного анализа, а также перекрестного анализа с целью экономии энергии и повышения энергоэффективности. Этот факт был подтвержден Вангом и др., которые отметили отсутствие литературы по энергоэффективности и сопоставительному анализу предприятий [9]. Наше исследование было выполнено на базе предприятий угольной промышленности Индии. Такие методы, как анализ временных рядов, внутренний и перекрестный сопоставительные анализы, были основаны на 4–5-летних полевых данных.

Дальнейший анализ показывает, что Саху и др. [10, 11] выполнили оценку энергоэффективности автосамосвалов на разрезах. В качестве показателя энергоэффективности для оценки энергоэффективности систем водоотведения на предприятиях [12], а также для сопоставительного анализа энергоэффективности энергоемких производств на Тайване [13] был использован показатель УПЭ. Топно и др. использовали УПЭ в качестве показателя эффективности для сопоставительного анализа потребления электроэнергии на угольных предприятиях [14, 15]. В настоящей работе предпринята попытка провести сопоставительный анализ потребления электроэнергии на угольных разрезах с целью определения эффективности работы разреза в различные периоды (по годам). Основная цель исследования – оценить передовые методы работы и установить цели на предстоящий год. Также изучались энергетические показатели для различных условий работы в течение всего года, чтобы установить практический эталон для открытых горных работ. Для проведения сопоставительного анализа была разработана схема моделирования с использованием статистического подхода, применимого к горному делу. В дальнейшем модель была расширена на использование электроэнергии на аналогичных открытых разработках в Индии. Модель была протестирована на крупном угольном разрезе в Индии с использованием данных временных рядов с помощью статистического подхода. Анализировались совокупные годовые данные, а также данные об оборудовании с целью прогнозирования контрольного показателя УПЭ. Полученный таким образом контрольный показатель дал нам минимальную мощность, необходимую для процесса добычи, в качестве передовой практики в горном деле за последние годы. Потенциал энергосбережения (предприятия) обеспечивает постоянное совершенствование и повышение эффективности. Настоящая работа представляет собой

¹ Ministry of Coal, Government of India. URL: <https://coal.gov.in/index.php/major-statistics/production-and-supplies>

² I bid.

³ Canadian Industry Program for Energy Conservation (CIPEC). Benchmarking the energy consumption of Canadian open-pit mine. Report No. 2005. URL: <https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/publications/industrial/mining/open-pit/Open-Pit-Mines-1939B-Eng.pdf>

⁴ Government of India, Ministry of Statistics and Programme Implementation, Energy statistics 2018: Central statistics office. URL: <http://mospi.nic.in/publication/energy-statistics-2018>

⁵ US Energy information and administration, US Industrial sector energy consumption by type of Industry. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/industry.php>

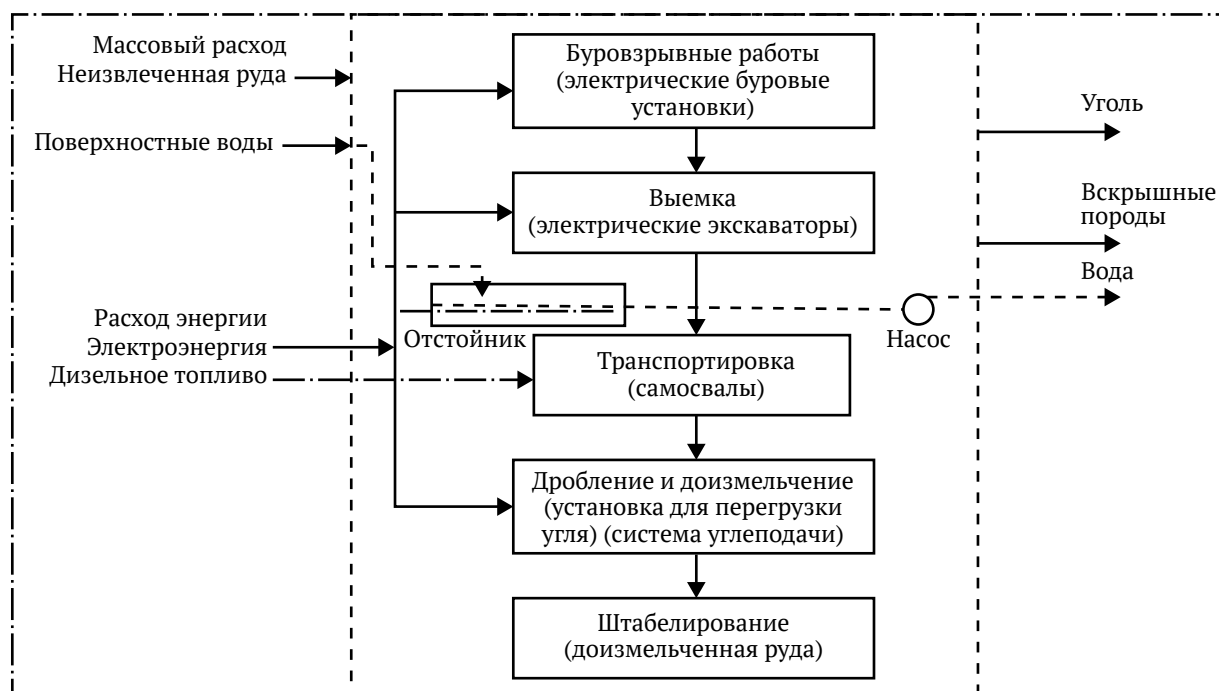


Рис. 1. Процесс открытой разработки [14]

расширенное исследование в виде сопоставительного анализа энергоэффективности энергопотребления на разрезах, проведенное Топно и др. [14]. В дополнение к сопоставительному анализу предприятий был проведен перекрестный сопоставительный анализ.

1. Процесс добычи и энергопотребление

Процесс добычи угля открытым способом включает в себя буровзрывные работы, выемку, транспортировку, дробление и сортировку угля (рис. 1). Процесс добычи угля на предприятии может быть как традиционным, так и ручным или механизированным. Основное рабочее оборудование на крупных разрезах включает в себя мощные электрические канатные экскаваторы для проведения погрузочных работ, самосвалы большой грузоподъемности для транспортировки руды, дизельные экскаваторы, бульдозеры и электронасосы для водоотведения. В качестве оборудования для перевалки угля на карьерах используются дробилки и виброгрохоты, позволяющие получить уголь требуемой фракции. Для работы всех основных агрегатов необходима энергия. При проведении горных работ на угольных разрезах основными источниками энергии являются электроэнергия и дизельное топливо (используемое в качестве топлива для машин). Потребление электроэнергии в разрезе, работающем по технологии «экскаватор–самосвал», составляет 52 % от общего объема энергии, поставляемой на предприятие.

1.1. Использование электроэнергии в карьере

Энергоснабжение предприятия обеспечивается за счет дизельного топлива и электроэнергии. Для проведения в действие большей части или всего тяжелого землеройно-транспортного оборудования в качестве

энергоносителя используют в основном дизельное топливо. К электрооборудованию, являющемуся предметом нашего исследования, относятся кабельные экскаваторы, буровые установки, дробилки, насосы установок для перегрузки угля, а также рудничное освещение. Профиль энергопотребления угольных разрезов (комбинация «экскаватор–самосвал») с установкой для перегрузки угля в процентном соотношении представлен на рис. 2. Доля экскаваторов и установок для перегрузки угля с электрическим приводом наиболее высокая (более 50 % от общего потребления электроэнергии на предприятии). На долю насосов приходится 18 % энергопотребления, что влияет на удельное энергопотребление предприятия. Энергопотребление также зависит от количества осадков, выпадающих в районе предприятия, и применения насосов, т.е. времени их работы.

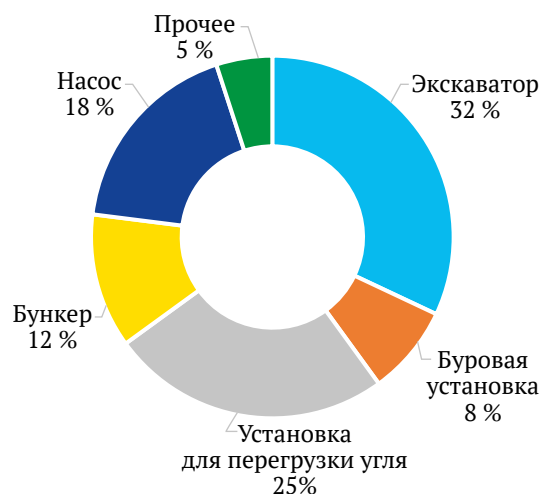


Рис. 2. Энергетический профиль

1.2. Распределение электроэнергии

Распределение электроэнергии, как и потребление энергии, имеет большое значение. «Высоковольтные» и «средневольтные» системы передачи электроэнергии являются двумя наиболее важными системами распределения электроэнергии практически на всех карьерах. Большинство карьеров запитываются от высоковольтных распределительных линий, поскольку потребители электроэнергии, как правило, расположены вдали от распределительных сетей. В данном случае питание осуществляется от подстанции 132/33 кВ через понижающие трансформаторы (2 шт. по 36 МВА). Первичное напряжение 33 кВ является обычным для такого горнодобывающего оборудования, как электрические экскаваторы и буровые установки. Оборудование для перемещения угля, насосы и освещение запитываются по линиям среднего/низкого напряжения 6,6 кВ/3,3 кВ/440 В. Однолинейная схема распределения электроэнергии показана на рис. 3.

2. Методика

Сопоставительный анализ энергопотребления угольных разрезов проводился с использованием «статистического подхода». При этом применялись два следующих метода:

1. Внутренний сопоставительный анализ (в пределах предприятия).

2. Перекрестный сопоставительный анализ.

2.1. Внутренний сопоставительный анализ

Для сопоставительного анализа УПЭ была разработана статистическая модель, использующая данные о потреблении электроэнергии в прошлом и общие данные производства. На технологической схеме метода показаны этапы работы (рис. 4), а на рис. 5 опи-

саны этапы построения модели. Следует отметить, что энергия расходуется на перевалку как вскрышных пород, так и угля (полезного ископаемого). Общий объем производства учитывается при оценке энергоэффективности и проведении внутреннего сопоставительного анализа, т.е. в пределах предприятия.

Ниже приведена формула, используемая для расчета УПЭ и месячного/годового прогрессивного показателя потребления энергии для технологического процесса, оборудования или предприятия. Для более детального понимания используются уравнения (1)–(8).

Прогрессивный показатель УПЭ для каждого процесса/оборудования

УПЭ за каждый прогрессивный год ($j = 1, 2, \dots, 4$) для всех видов оборудования/процессов (буровых установок, электроэкскаваторов, установок для перегрузки угля, насосов) рассчитывается по уравнению

$$\text{УПЭ}_{j,k} = \frac{\sum_{k=1}^n E_{c,j,k}}{Q_{t,j}} \quad (j = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

где единица оборудования k соответствует экскаваторам ($k = 1$), буровым установкам ($k = 2$), установкам для перегрузки угля ($k = 3$), бункерным насосам и прочему оборудованию; E_c – общегодовое потребление энергии для каждой единицы оборудования/процесса $k = 1, 2; \dots, n$; Q_t – общий объем производства (сумма объемов производства угля Q_y и перевалки вскрышных пород $Q_{\text{вскр}}$) для $j = 1, 2, \dots, 4$:

$$Q_t = Q_y + Q_{\text{вскр}}, \quad (2)$$

где

$$Q_{\text{вскр}} = \rho_{\text{вскр}} V_{\text{вскр}}. \quad (3)$$



Рис. 3. Распределение электроэнергии в угольном разрезе

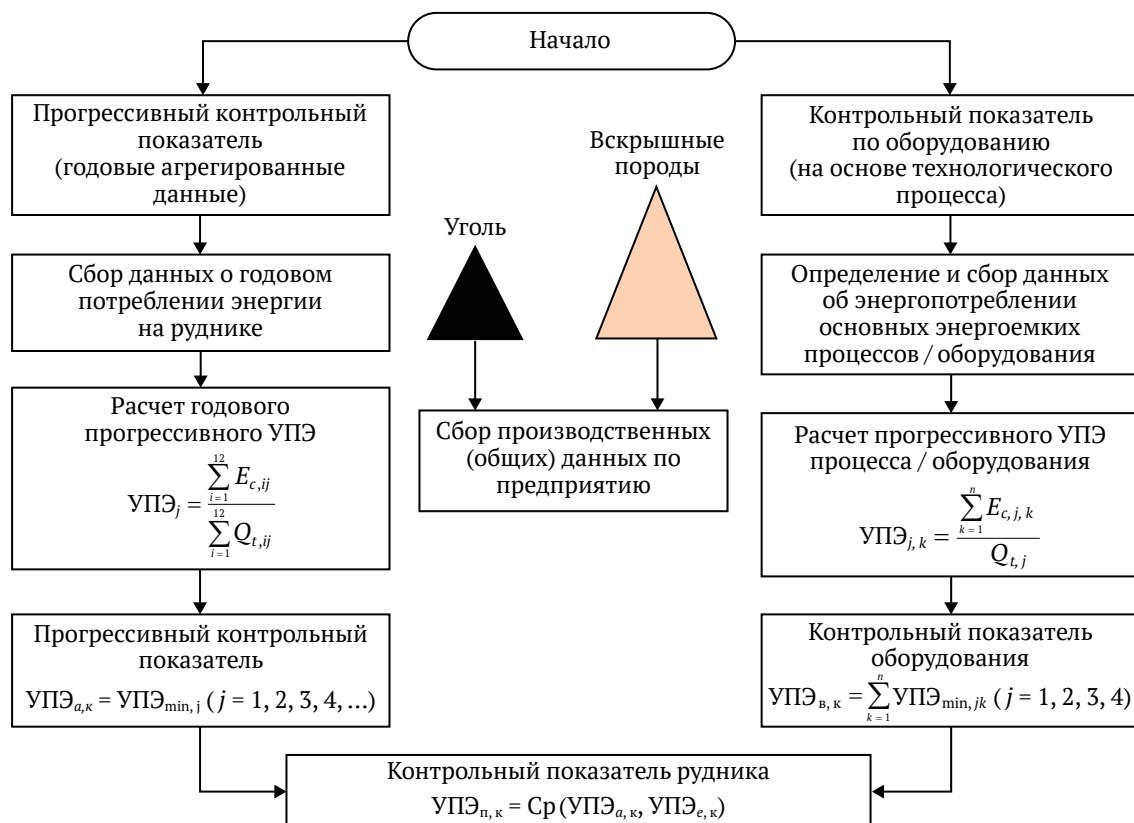


Рис. 4. Методика проведения сопоставительного анализа

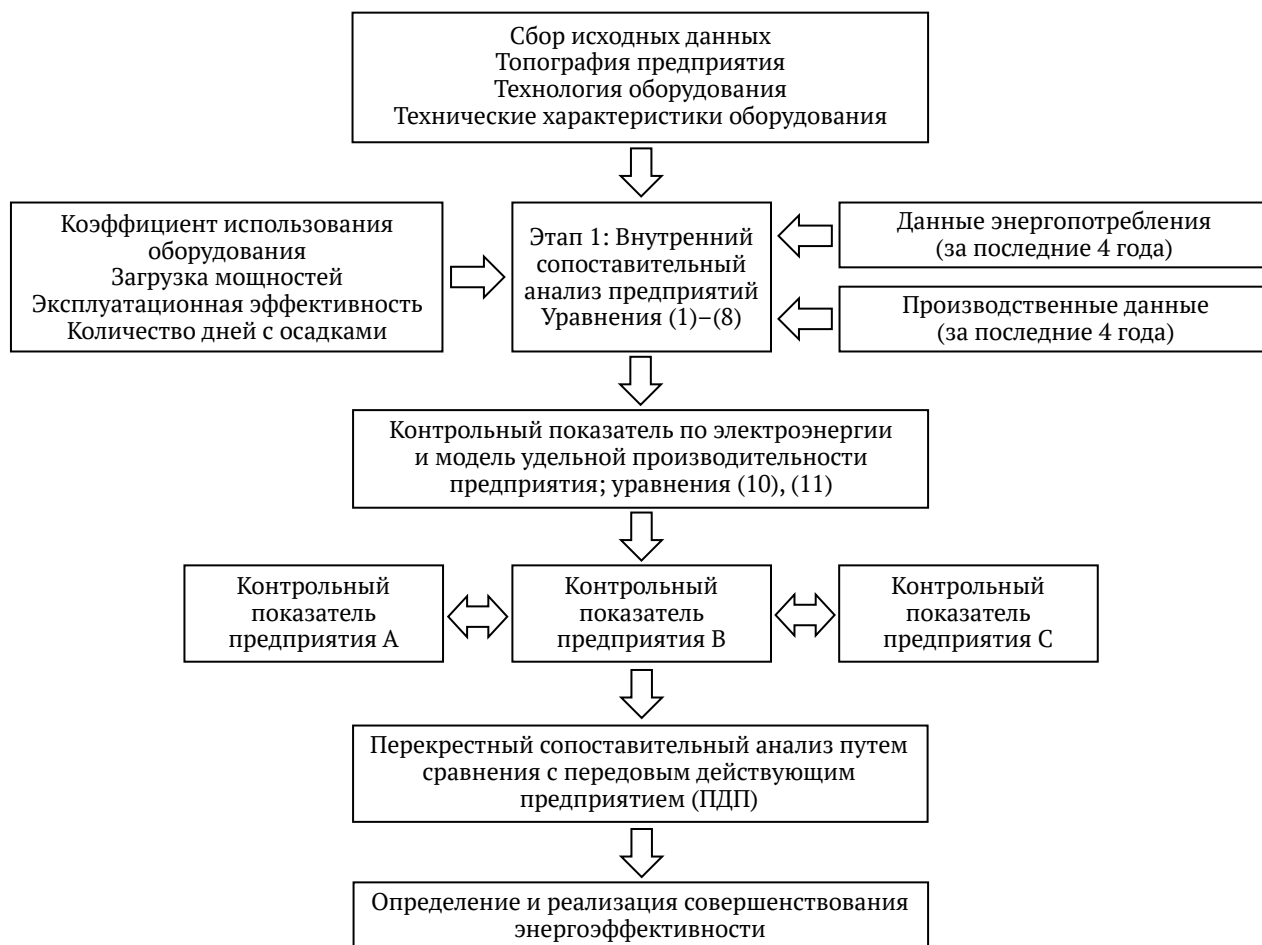


Рис. 5. Шаги и этапы статистической модели



Месячный и годовой прогрессивный показатель УПЭ предприятия

УПЭ в кВт-ч/т определяется как отношение общего энергопотребления E_c к общему объему производства Q_t за конкретный месяц/год. Для его оценки использовались агрегированные данные по месячному/годовому энергопотреблению и общему объему производства. Для анализа отклонений были изучены месячный и годовой прогрессивные показатели УПЭ, т.е. УПЭ_и и УПЭ_г.

Месячный УПЭ имеет вид

$$\text{УПЭ}_i = \frac{E_{c,i}}{Q_{t,i}} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, 12), \quad (4)$$

где $E_{c,i}$ – потребление энергии за i -й месяц года; $Q_{t,i}$ – общий объем производства за соответствующий месяц.

Годовой прогрессивный УПЭ (УПЭ_г) j -го года задается как

$$\text{УПЭ}_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} E_{c,ij}}{\sum_{i=1}^{12} Q_{t,ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, 4). \quad (5)$$

Контрольный показатель предприятия

Контрольный показатель УПЭ предприятия (УПЭ_{п,к}) на предстоящий год рассчитывается на основании среднего контрольного показателя, полученного по прогрессивному УПЭ для каждого технологического процесса/оборудования, а также по годовому прогрессивному УПЭ предприятия.

Прогрессивный контрольный показатель УПЭ оборудования/технологического процесса (УПЭ_{е,к}) оценивается следующим образом:

$$\text{УПЭ}_{в,к} = \sum_{k=1}^n \text{УПЭ}_{\min,jk} \quad (j = 1, 2, \dots, 4). \quad (6)$$

Годовой контрольный показатель УПЭ предприятия получают путем сравнения прогрессивного УПЭ за последние 4 года и рассчитывают следующим образом:

$$\text{УПЭ}_{а,к} = \text{УПЭ}_{\min,j} \quad (j = 1, 2, 3, 4). \quad (7)$$

Таким образом, общий контрольный показатель предприятия представлен следующим уравнением:

$$\text{УПЭ}_{п,к} = \text{Ср}(\text{УПЭ}_{е,к}, \text{УПЭ}_{а,к}). \quad (8)$$

2.2. Перекрестный сопоставительный анализ

Перекрестный сопоставительный анализ по УПЭ может быть выполнен или смоделирован с использованием уравнения (9). Данное уравнение может быть использовано только для подобных угольных предприятий, в которых применяется комбинация «экскаватор–самосвал». Влияние оказывают система разработки (добычи), используемое оборудование, перемещаемые уголь/руда/материал, а также применяемые способы эксплуатации электрического оборудования:

$$\text{УПЭ}_k = \text{УПЭ}_{\min,r} \quad (r = 1, 2, 3, \dots, m). \quad (9)$$

3. Ситуационное исследование

Для оценки угольного разреза Дипка, крупнейшего угольного разреза в Корбе, штат Чхаттисгарх, Индия, к сопоставительному исследованию был применен статистический подход. Предприятие принадлежит государственной компании M/s South Eastern Coalfields Ltd (SECL) и считается важным угледобывающим предприятием Индии. Исходные данные по энергопотреблению и производству (количеству материала, перемещаемому добычным оборудованием, и инженерным объектам) были получены в ходе визитов на разрез Дипка в различные периоды в процессе проведения исследования. Подключенная электрическая нагрузка разреза составляет 38,49 мВт, включая следующее: электрические экскаваторы с емкостью ковша 42 и 10 м³, насосы мощностью 3,3 кВ/440 В, установка для перегрузки угля, бункеры и прочие энергопотребители. Годовая потребляемая мощность разреза составляет 49 гВт-ч (2014–2015 гг.). Установленная производственная мощность разреза – 25 млн т/год при среднем коэффициенте вскрыши 1 : 1. Это значит, что для извлечения одного кубического метра угля требуется переместить один кубический метр вскрышных пород.

3.1. Энергоэффективность

Для добычи угля на разрезе Дипка используется комплекс оборудования, УПЭ которого рассчитывалось на основании энергопотребления отдельных единиц оборудования, используемых на разрезе, с применением уравнения (1). На рис. 6 показано годовое отклонение среднего показателя УПЭ для каждой единицы оборудования. Для сопоставительного анализа использовалось среднее УПЭ в связи с сезонным колебанием электрических нагрузок. Были проанализированы минимальное, максимальное и среднее УПЭ экскаватора, буровой установки, насосов и установки для перегрузки угля для разреза. Диапазон УПЭ для оборудования разреза показан на рис. 7. Эксплуатационные и энергетические характеристики оборудования представлены в табл. 1.

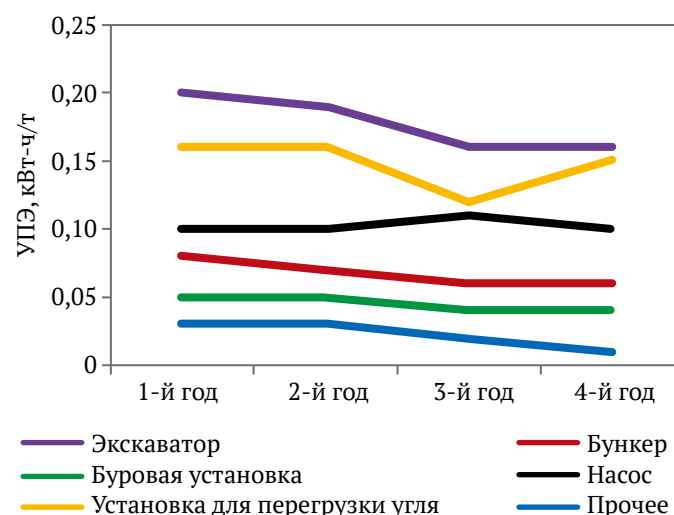


Рис. 6. Анализ прогрессивного показателя УПЭ по оборудованию

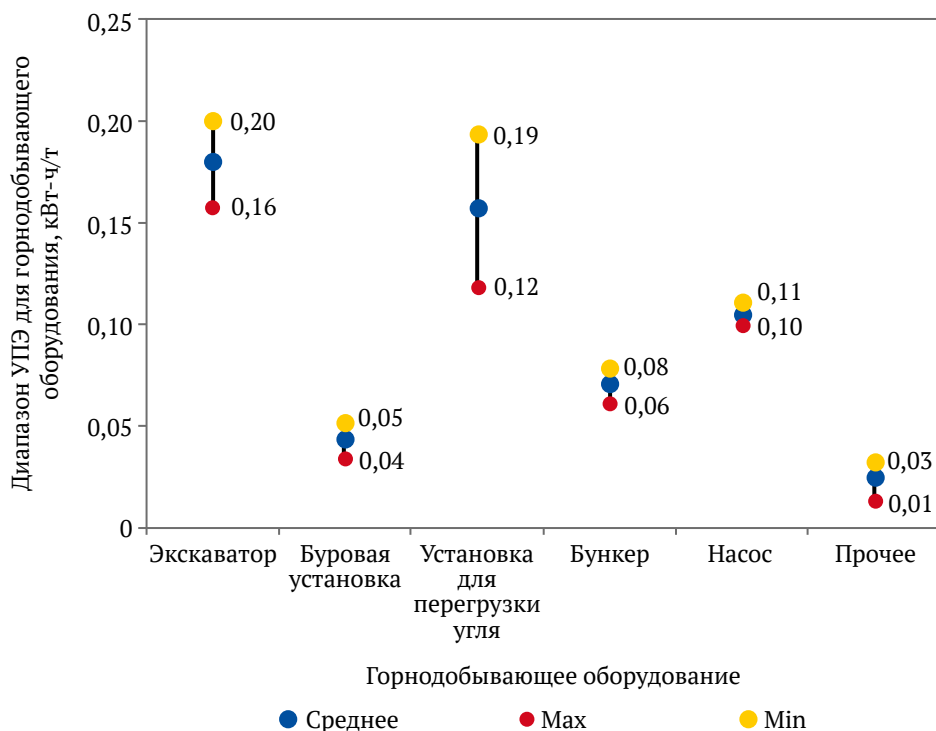


Рис. 7. Диапазон УПЭ горнодобывающего оборудования

Таблица 1

Эксплуатационные и энергетические характеристики разреза (ситуационное исследование)

Наименование оборудования	Технологический процесс	Показатель, определяющий производительность	Производитель	Потребляемая энергия	Энергопотребление, млн ед./тыс. л/год*
Электрический канатный экскаватор	Выемка	42 м ³	P &H and Bucyrus	Электричество (6,6 кВ)	16
Электрический экскаватор		5–10 м ³			
Гидравлические экскаваторы	Выемка	4,3 м ³	BEML BE 1000	Дизельное топливо	1005
Автопогрузчик		0,96–10 м ³			
Электрические буровые установки	Бурение	–	–	Электричество (6,6 кВ)	3
Гидравлические буровые установки	Бурение	Диаметр 6,3 дюйма, глубина 8 м	IDM 30	Дизельное топливо	380
Большегрузные самосвалы	Транспортировка	240 / 120 /100 т	BEML / Caterpillar / Terex	Дизельное топливо	6715
Большие бульдозеры	Транспортировка	320 /410 / 850 л.с.	BH-35-II CAT834B Komatsu	Дизельное топливо	2899
Установка для перегрузки угля и бункеры	Дробление и сортировка угля	–	–	Электричество	20
Насосы	Откачка рудничной воды	2775 л/с	–	Электричество	10
Общее потребление энергии		–	–	–	49 млн ед.

* млн ед. – киловатт-часов в случае энергопотребления; тыс. л/год – расход дизельного топлива.



Таблица 2

Анализ годового прогрессивного УПЭ угольного предприятия

Год	Общее потребление в единицах, кВт-ч · 10 ⁶	Уголь, млн т	Вскрыша, млн т	Общий объем производства, млн т	УПЭ общее, кВт-ч/т
2011–2012	34,87	25,00	31,10	56,10	0,62
2012–2013	37,49	29,13	33,59	62,72	0,60
2013–2014	40,24	29,18	49,10	78,28	0,51
2014–2015	49,30	31,00	63,73	94,73	0,52
Среднее	40,48	28,58	44,38	72,96	0,56

Таблица 3

Анализ годового прогрессивного УПЭ по различным угольным предприятиям

Исследованные предприятия*	Годовое потребление энергии, кВт-ч · 10 ⁶	Добыча угля, млн т	Перемещение вскрышных пород, млн т	Общий объем производства, млн т	УПЭ общее, кВт-ч/т
A	49	31	63,73	94,73	0,517
B	118	41	61,085	102,09	1,156
C	50	18,75	61,46	80,21	0,623
D	16,5	2,51	11,81	14,32	1,15
E	18	2,59	4,0145	6,60	2,727
F	8	1,34	2,077	3,42	2,339

*действующие предприятия, подобные исследуемому здесь, с различной производственной мощностью.

Согласно рис. 7 минимальное УПЭ электрического экскаватора составляет 0,16 кВт-ч/т, минимальное УПЭ установки для перегрузки угля – 0,12 кВт-ч/т, насоса – 0,10 кВт-ч/т. Контрольный показатель УПЭ разреза с учетом горнодобывающего оборудования и прочих инженерных систем – 0,49 кВт-ч/т. Диапазон УПЭ для установки для перегрузки угля весьма широкий в связи с колебанием входящего угольного потока на дробилки и конвейеры. Что касается экскаваторов, то для них диапазон УПЭ также широкий в связи с применением различных методов работ и перемещением различных материалов на предприятии. Контрольный показатель УПЭ для анализа УПЭ по типам оборудования путем сравнения данных удельного расхода энергии по всему оборудованию оценивается равным 0,49 кВт-ч/т.

3.2. Контрольный показатель УПЭ в пределах предприятия

Прогрессивное УПЭ предприятия рассчитывается на основании годового энергопотребления предприятия и соответствующего общего объема производства. Анализ годового прогрессивного УПЭ угледобычи представлен в табл. 2. Среднее прогрессивное УПЭ равняется 0,56 кВт-ч/т от общего объема производства, минимальное – 0,51 кВт-ч/т. С помощью уравнения (9) получаем контрольный показатель УПЭ разреза, равный 0,50 кВт-ч/т.

3.3. Контрольный показатель УПЭ для подобных предприятий

Был проведен перекрестный сопоставительный анализ шести действующих предприятий (предприятия A, B, C, D, E, F) путем сравнения удельного энер-

гопотребления по каждому из них (табл. 3)⁶. Все эти разрезы с различной производственной мощностью добывают уголь и имеют характеристики, подобные таковым исследуемого здесь разреза.

4. Результаты и обсуждение

Расчетный контрольный показатель УПЭ для ситуационного исследования составляет 0,50 кВт-ч/т. Тем не менее месячный показатель УПЭ в течение года может сильно варьироваться в связи с муссонами. Среднее минимальное УПЭ для засушливого сезона составляет 0,43 кВт-ч/т, для сезона дождей – 0,52 кВт-ч/т. Средний прогрессивный показатель УПЭ – 0,56 кВт-ч/т. Если сравнить контрольный показатель УПЭ и среднее УПЭ, то расчетный потенциал энергосбережения составляет 10,7 %. Области энергосбережения можно определить путем детального исследования опытно-промышленной эксплуатации оборудования на предприятии с использованием современных методов энергетического аудита. Опытно-промышленные работы были выполнены на электрическом экскаваторе Р&Н на разрезе Дипка. УПЭ рассчитывалось на основании фактического объема перемещенного материала и потребления энергии для проверки полученного результата. УПЭ только электрического экскаватора оценивается в 0,18 кВт-ч/т и составляет 36 % от общего объема потребляемого электричества.

⁶ CIMFR studies and technical communications on energy efficiency and benchmarking in Opencast mines. 2015.



4.1. Модель энергоэффективности предприятия

Для получения корреляции между удельным потреблением энергии и общим объемом производства Q был применен метод линейной регрессии. Результаты расчетов приведены на рис. 8. Отклонения УПЭ в зависимости от общего объема производства были отображены в виде графика. График рассеяния показывает зависимость между годовым накопленным прогрессивным УПЭ_а и общим объемом производства Q_t и описывается уравнением (значение R^2 линейной регрессии составляет 0,791):

$$\text{УПЭ}_a = -0,002Q_t + 0,771. \quad (10)$$

Линейный тренд имеет отрицательный уклон и указывает на то, что с увеличением общего объема производства УПЭ снижается. Эта линейная модель может быть использована для прогнозирования УПЭ в случае увеличения или уменьшения объема производства. Из рис. 9 следует, что с увеличением общего объема производства энергопотребление также увеличивается. С другой стороны, УПЭ снижается за счет оптимального использования горнодобывающего оборудования на предприятии. Модель может

быть использована для прогнозирования УПЭ предприятия при различных показателях перемещения материалов. Схема моделирования была разработана Топно и др. [15] для оценки энергоэффективности электрического экскаватора, работающего на том же разрезе. Полученные данные по УПЭ составили 0,12 кВт-ч/м³.

Для другой модели предприятия использована линейная модель регрессии, основанная на фактических накопленных данных удельного расхода электроэнергии и общего объема производства предприятия с различными топографическими, техническими и энергетическими параметрами прошлых лет, приведенными в табл. 4:

$$\text{УПЭ}_a = -6 \times 10^{-8}Q_t + 1,8995. \quad (11)$$

На рис. 10 показана линейная модель с различными коэффициентами x и константой. Константа и коэффициент x варьируются по предприятиям в зависимости от топографии, используемого на предприятии оборудования и энергетических характеристик.

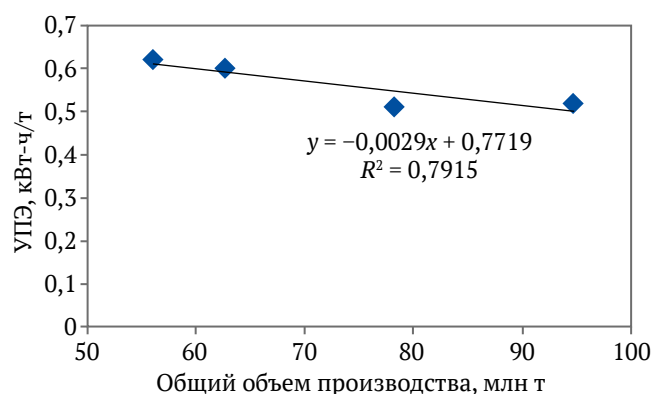


Рис. 8. Отклонение УПЭ в зависимости от объема производства

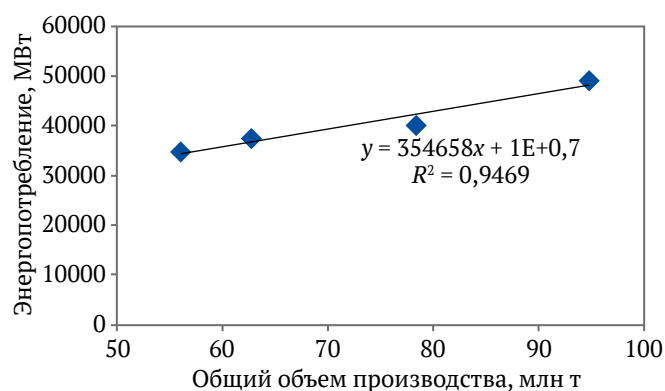


Рис. 9. Изменение потребления электроэнергии

Таблица 4

Оборудование и энергетические характеристики предприятия D

Наименование оборудования	Технологический процесс	Мощность	Потребляемая энергия	Энергопотребление, млн ед./ тыс. л/год*
Электрический экскаватор	Выемка	2,4 / 5 / 10 м ³	Электричество 3,3 кВ и 6,6 кВ	16,5 млн ед.
Электрические буровые установки	Бурение	160 мм		
Установка для перегрузки угля и бункеры	Дробление и сортировка угля	–		
Насосы	Откачка рудничной воды	732 л/с	Электричество 3,3 кВ / 415 В	
Гидравлические экскаваторы Автопогрузчик	Выемка	3,5 м ³ (общ.)	Дизельное топливо	1557,6
Гидравлические буровые установки	Бурение	160 мм	Дизельное топливо	871,6
Самосвалы со средней грузоподъемностью Scania	Транспортировка	60, 50, 35 т	Дизельное топливо	3106,6
Бульдозеры	Транспортировка	320/BD155 410/BD355	Дизельное топливо	978,1

*млн ед. = киловатт-часов в случае энергопотребления; тыс. л/год – расход дизельного топлива.



Удельное энергопотребление в представленных моделях (уравнения (10), (11)) показывает его изменение при различном общем объеме производства для двух разрезов с различной производственной мощностью, характеристиками оборудования, а также профилями энергопотребления. Характеристики оборудования и энергопотребления влияют на энергоэффективность предприятия.

4.2. Сезонный анализ УПЭ

На рис. 11 представлен временной ряд месячных значений показателей УПЭ. Анализ показывает, что удельное потребление электроэнергии в июле–октябре выше, чем в ноябре–июне. В эти месяцы удельный объем производства ниже, что связано с влиянием муссонов на горные работы и низкой загрузкой электрических экскаваторов, буровых установок и т.д. Кроме того, УПЭ выше из-за повышенной нагрузки на насосы, используемые для водоотведения. На графике (рис. 12) видно, что среднемесячное минимальное значение УПЭ в засушливый сезон и в сезон дождей изменяется от 0,43 до 0,52 кВт-ч/т. Сезонный анализ УПЭ позволяет руководству предприятия подготовить план на период муссонов по снижению энергопотребления путем оптимизации графика работы насосов и машин.

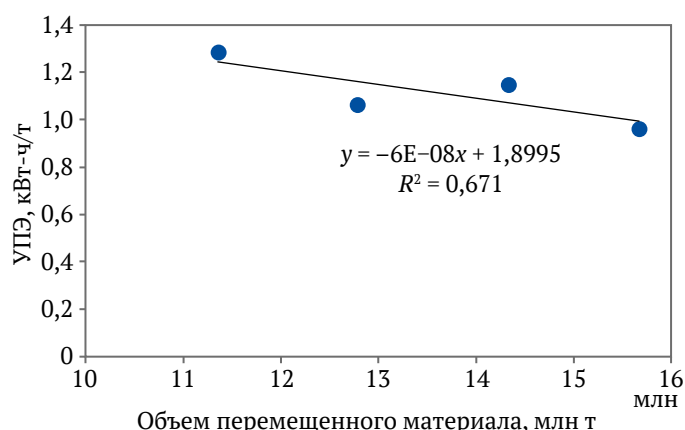


Рис. 10. Линейная модель с различными коэффициентами x и константой

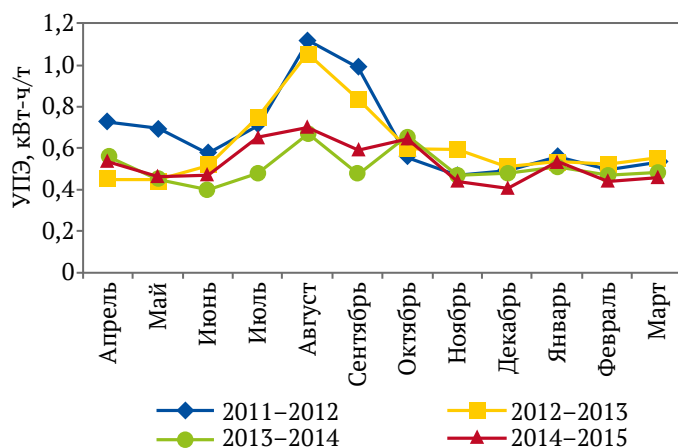


Рис. 11. Сезонный анализ УПЭ

4.3. Сопоставительный анализ подобных угольных предприятий

Результаты, полученные Исследовательским центром Нагпура Центрального института горного дела и научно-исследовательских работ по изучению и использованию топлива⁷ путем сравнения различных угольных разрезов для различных проектов энергоэффективности, представлены в табл. 3 и на рис. 13.

Накопленное УПЭ подобных разрезов варьируется от 0,52 до 1,15 кВт-ч/т, минимум 0,52 кВт-ч/т, поскольку на крупных предприятиях (с производственной мощностью более 30 млн т) используются высокопроизводительные электрические экскаваторы, которые являются основным энергопотребителем (36 %). На небольших предприятиях, добывающих от 1,3 до 2,6 млн т угля, УПЭ колеблется в пределах от 1,15 до 2,72 кВт-ч/т.

4.4. Энергосберегающий потенциал

Сравнивая прогрессивный контрольный показатель УПЭ_{п,к} и среднегодовой показатель УПЭ_{а,ср}, можно оценить потенциал энергосбережения для угольного предприятия. Расчет выполняется с использованием уравнения, приведенного ниже:

⁷ CIMFR studies and technical communications on energy efficiency and benchmarking in Opencast mines. 2015.

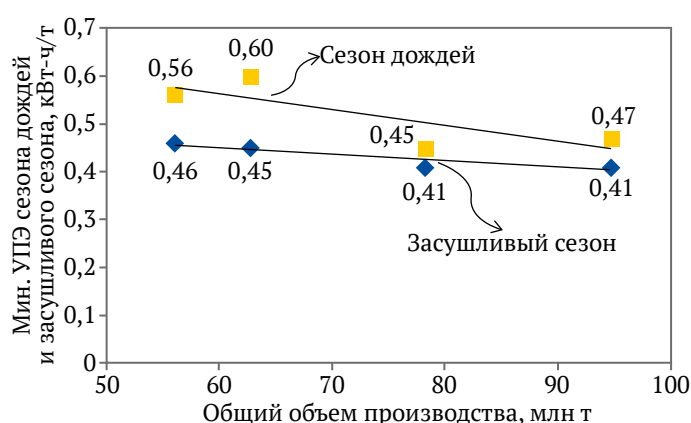


Рис. 12. Ежемесячный показатель УПЭ для засушливого сезона и сезона дождей

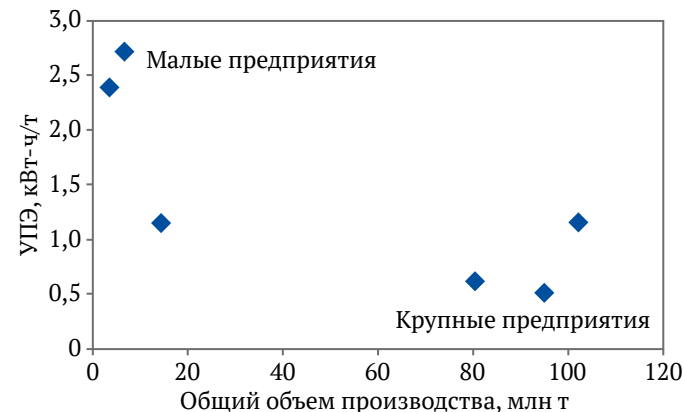


Рис. 13. Результаты, полученные путем сравнения различных угольных разрезов



$$E_c = \text{УПЭ}_{a, \text{cp}} = \frac{(\text{УПЭ}_{a, \text{cp}} - \text{УПЭ}_{p, \text{к}}) \cdot 100}{\text{УПЭ}_{a, \text{cp}}}, \quad (12)$$

где $\text{УПЭ}_{a, \text{cp}}$ – среднегодовое прогрессивное УПЭ,

$$\text{УПЭ}_{a, \text{cp}} = \frac{\sum_{j=1}^4 \text{УПЭ}_j}{4}. \quad (13)$$

Согласно уравнению (12) энергосберегающий потенциал предприятия составляет 10,7 %, при этом он может варьироваться по каждому прогрессивному году на основании анализа данных четырех лет и фактических условий эксплуатации предприятия.

Заключение

Сопоставительный анализ энергопотребления является эффективным инструментом оценки и сравнения энергоэффективности предприятий. Карьеры, обрабатывающие уголь (и прочие полезные ископаемые), являются промышленными бенефициарами сопоставительного анализа. Как внутренний сопоставительный анализ, так и перекрестный сопоставительный анализ могут использоваться руководством предприятия для определения ключевых областей, требующих повышения эффективности. Они также способствуют снижению энергопотребления и установлению целевых показателей для горнодобывающего сектора, а также энергопотребления в отрасли. В данной исследовательской работе был выполнен со-

поставительный анализ использования электроэнергии на крупном разрезе в Индии, при этом прогрессивный контрольный показатель УПЭ оценивается равным 0,50 кВт-ч/т.

Новый метод сравнения и моделирования с использованием эксплуатационных данных прошлых периодов по каждому процессу, а также накопленных данных по общему объему производства и энергопотребления был применен к различным угольным разрезам как малого, так и крупного размера. Для получения текущих данных по конкретным предприятиям использовались методы линейной регрессии. В частности, для прогнозирования контрольного УПЭ были выбраны угольные предприятия индийской горнодобывающей отрасли. Контрольные показатели, полученные методом внутреннего сопоставительного анализа, могут быть использованы для оценки энергоэффективности конкретного предприятия, а УПЭ, полученное с помощью перекрестного сопоставительного анализа, может быть применено для оценки наиболее эффективных предприятий, использующих передовые методы. Также была выполнена оценка потенциала энергосбережения предприятия.

В целом можно сделать вывод о том, что оценка энергоэффективности конкретного предприятия или группы предприятий может быть выполнена с использованием предложенных в данной работе моделей сопоставительного анализа для горнодобывающего сектора и применена для оценки и реализации потенциала энергосбережения.

Список литературы / References

1. Sahoo L.K., Bandyopadhyay S., Banerjee R. Benchmarking energy efficiency of opencast mining in India. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Energy Research (ICAER-2013)*. 10–12 December 2013, Mumbai, India. Pp. 1684–1692.
2. Shuzhao C., Qingxian C., Cangyan X., Wang H. Energy consumption comparison and energy-saving measures of open pit development. In: *Proceedings of International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*. 19–20 February 2011, Changsha, China. Pp. 712–715. <https://doi.org/10.1109/CDCIEM.2011.64>
3. Boyd G., Dutrow E., Tunnessen W. The evolution of the ENERGY STAR® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use. *Journal of Cleaner Production*. 2008;16(6):709–715. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.02.024>
4. Cooke D., Randall C. Energy use benchmarks for open cut coal mines. In: *Proceedings of The AusIMM annual conference*. 23–26 March 1995, Newcastle, Australia. URL: https://old.decoa.com.au/HTMLObj-480/Energy_Use_Benchmarks_Coal_Mines.pdf
5. Sardeshpande V., Gaitonde U.N., Banerjee R. Model-based energy benchmarking for glass furnace. *Energy Conversion and Management*. 2007;48(10):2718–2738. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.04.013>
6. Beerkens R.G.C., Limpt J.V. Chapter 7. Energy efficiency benchmarking of glass furnaces. In: Kieffer J. (ed.) *62nd Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Vol. 23*. The American Ceramics Society; 2008. Pp. 93–105. <https://doi.org/10.1002/9780470294727.ch7>
7. Tan Y.S., Tjandra T.B., Song B. Energy efficiency benchmarking methodology for mass and high-mix low-volume productions. *Procedia CIRP*. 2015;29:120–125. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.200>
8. Juaidi A., AlFaris F., Montoya F.G., Agugliaro F.M. Energy benchmarking for shopping centres in the Gulf Coast region. *Energy Policy*. 2016;91: 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.012>
9. Wang N., Wena Z., Liu M., Guo J. Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. *Applied Energy*. 2016;169:301–308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.030>
10. Sahoo L.K., Bandyopadhyay S., Banerjee R. Benchmarking energy consumption of dump trucks in mines. *Applied Energy*. 2014;113:1382–1396. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.058>
11. Sahoo L.K., Bandyopadhyay S., Banerjee R. Benchmarking energy consumption of truck haulage. In: Awuah-Offei K. (eds.) *Energy Efficiency in the Minerals Industry. Green Energy and Technology*. Springer, Cham; 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54199-0_9



12. Sahoo L.K., Bandyopadhyay S., Banerjee R. Water and energy assessment for dewatering in opencast mines. *Journal of Cleaner Production*. 2014;84:736–745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.072>
13. Chan D.Y.L., Huang C.F., Lin W.C., Hong G.B. Energy efficiency benchmarking of energy-intensive industries in Taiwan. *Energy Conversion and Management*. 2014;77:216–220. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.027>
14. Topno S.A., Sahoo L.K., Umre B.S., Jhungare A.S. Energy efficiency benchmarking of power consumption for an opencast coal mine. In: *Efficiency, Cost, Optimisation, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2017)*. 2–6 July 2017, San Diego, California, USA.
15. Topno S.A., Sahoo L.K., Umre B.S. Energy efficiency assessment of electric shovel operating in opencast mine. *Energy*. 2021;230:120703. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120703>

Информация об авторах

Сима Ашишан Топно – главный исследователь, Центральный институт горного дела и топливных исследований CSIR, Нагпурский исследовательский центр, г. Нагпур, Индия; Национальный технологический институт Висвесварая, факультет электротехники, г. Нагпур, Индия; ORCID [0000-0003-2941-3047](https://orcid.org/0000-0003-2941-3047), Scopus ID [57202512585](https://scopus.com/authorid/57202512585); e-mail seematopno@rediffmail.com

Бхимрао Ситарам Умре – доктор наук (электротехника), профессор кафедры электротехники, Национальный технологический институт Висвесварая, г. Нагпур, Индия; ORCID [0000-0002-9879-2928](https://orcid.org/0000-0002-9879-2928), Scopus ID [24483922300](https://scopus.com/authorid/24483922300); e-mail bsumre@rediffmail.com

Мохан Виталрао Авар – доктор наук (электротехника), профессор кафедры электротехники, Национальный технологический институт Висвесварая, г. Нагпур, Индия; ORCID [0000-0003-3806-7908](https://orcid.org/0000-0003-3806-7908), Scopus ID [6602631834](https://scopus.com/authorid/6602631834); e-mail mvaware@eee.vnit.ac.in

Лалит Кумар Саху – главный исследователь, Центральный институт исследований горного дела и топлива, Нагпурский исследовательский центр, Нагпур, Индия; ORCID [0000-0001-8924-6741](https://orcid.org/0000-0001-8924-6741), Scopus ID [55901599900](https://scopus.com/authorid/55901599900); e-mail lalitsahoo@yahoo.co.in

Information about the authors

Seema Ashishan Topno – Principal Investigator, CSIR-Central Institute of Mining & Fuel Research, Nagpur Research Centre, Nagpur, India; Visvesvaraya National Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Nagpur, India; ORCID [0000-0003-2941-3047](https://orcid.org/0000-0003-2941-3047), Scopus ID [57202512585](https://scopus.com/authorid/57202512585); e-mail seematopno@rediffmail.com

Bhimrao Sitaram Umre – Ph. D. (Electrical Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur, India; ORCID [0000-0002-9879-2928](https://orcid.org/0000-0002-9879-2928), Scopus ID [24483922300](https://scopus.com/authorid/24483922300); e-mail bsumre@rediffmail.com

Mohan Vithalrao Aware – Ph. D. (Electrical Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Visvesvaraya National Institute of Technology, Nagpur, India; ORCID [0000-0003-3806-7908](https://orcid.org/0000-0003-3806-7908), Scopus ID [6602631834](https://scopus.com/authorid/6602631834); e-mail mvaware@eee.vnit.ac.in

Lalit Kumar Sahoo – Principal Investigator, CSIR-Central Institute of Mining & Fuel Research, Nagpur Research Centre, Nagpur, India; ORCID [0000-0001-8924-6741](https://orcid.org/0000-0001-8924-6741), Scopus ID [55901599900](https://scopus.com/authorid/55901599900); e-mail lalitsahoo@yahoo.co.in

Поступила в редакцию 23.03.2023
Поступила после рецензирования 17.07.2023
Принята к публикации 15.08.2023

Received 23.03.2023
Revised 17.07.2023
Accepted 15.08.2023



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-70>

УДК 621.316.575

**Моделирование защиты от несимметричных режимов работы высоковольтного асинхронного привода циркуляционного компрессора в установке гидроочистки топлив**В. В. Дмитриева  , А. Б. Хамматов 

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

 dm-valeriya@yandex.ru**Аннотация**

В нефтегазовой промышленности большую роль играют непрерывные технологические процессы, например, нефте- и газопереработка, которые чувствительны к многим внешним факторам. Такие процессы требуют реализации специальных процедур для остановки и повторного пуска. Для наладки технологического процесса необходимы очистка всей системы от непрореагировавших компонентов и их удаление. Забракованное сырьё зачастую сбрасывается на факел, что влечет за собой ощутимые экологические проблемы и значительный экономический ущерб. Важную роль в обеспечении непрерывных технологических процессов в нефтегазовой промышленности играют электротехнические системы (ЭТС), одним из ключевых элементов которых являются электродвигатели. Большую часть, не менее 80 %, используемых сегодня в промышленности электрических машин, составляют асинхронные двигатели (АД). Безаварийная их работа является одной из ключевых задач, что обеспечивает актуальность проектирования, моделирования и анализа действия систем релейных защит асинхронного двигателя, включая несимметричные режимы их работы. Эти режимы могут возникнуть при несимметричных схемах включения АД, несимметрии питающего напряжения, а также в результате каких-либо неисправностей в самой машине. Работа двигателя в таких условиях приведет к сокращению срока его службы, снижению мощности, износу и старению изоляции. В качестве исследуемого объекта выбран асинхронный электропривод циркуляционного компрессора блока гидроочистки бензина в комбинированной установке гидроочистки топлив, расположенного на Астраханском газоперерабатывающем заводе (АГПЗ). Для исследования работы и его защит авторы использовали моделирование в программе Matlab. В качестве основного теоретического метода выбран метод симметричных составляющих. Авторы разработали модель асинхронного электропривода циркуляционного компрессора; сформировали комплекс релейных защит (РЗ) и разработали модели следующих защит: «фильтр симметричных составляющих» (ФСС), максимальная токовая защита обратной последовательности «МТЗ $I_{\max \text{обр}}$ », защита от перегрузки. Продемонстрировано, что указанный комплекс релейной защиты полностью защищает двигатель от несимметричных режимов работы. Авторами было проведено исследование работы комплекса защит при различных несимметриях питающего напряжения, при различной нагрузке двигателя, сделан вывод о работоспособности разработанной защиты, а также даны рекомендации по его технической реализации на производстве. Выполненная работа может быть положена в основу разработки и тестирования релейной защиты элементов всей электротехнической системы установки гидроочистки топлив на Астраханском ГПЗ.

Ключевые слова

асинхронный двигатель, несимметричные режимы работы, несимметрия питающего напряжения, релейная защита, структурное моделирование, фильтр симметричных составляющих, максимальная токовая защита, защита от перегрузки, Sepam1000+, Matlab, Simulink

Для цитирования

Dmitrieva V. V., Khammatov A. B. Simulation of protection against unbalanced high-voltage asynchronous drive of recycle compressor in fuel hydrotreating unit. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):245–259. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-70>



POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Simulation of protection against unbalanced high-voltage asynchronous drive of recycle compressor in fuel hydrotreating unitV. V. Dmitrieva  , A. B. Khammatov 

I. M. Gubkin Russian State Oil and Gas University, Moscow, Russian Federation

 dm-valeriya@yandex.ru**Abstract**

In the oil and gas industry, continuous processes such as oil and gas refining play a great role and are sensitive to many external factors. Such processes require special procedures for stopping and restarting. In order to maintain a sustainable process, the entire system needs to be cleaned by removing of unreacted components. Rejected raw materials are often dumped into a flare leading to tangible environmental problems and significant economic disadvantages. Electrotechnical systems (ETS) play an important role in ensuring continuous technological processes in oil and gas industry. Electric motors are one of the key elements of ETS. The majority of the electrical machines used in industry today are Asynchronous motors (AM) – no less than 80 %. Ensuring their trouble-free operation is one of the key factors in the design, simulation, and analysis of asynchronous motor relay protection systems, including unbalanced conditions of their operation. These conditions can occur due to unbalanced AM connection circuits, supply voltage unbalance, or as any faults in a machine itself. Operating a motor under these conditions will result in shorter motor life, reduced power, wear and aging of the insulation. The study subject was an Asynchronous motor drive of a recycle compressor of a gasoline hydrotreating unit at the fuel hydrotreating integrated unit at the Astrakhan Gas Refining Plant (AGRP). The authors used Matlab simulations to study the facility and its protection systems/devices operation. The method of symmetrical components was selected as the main theoretical method. The authors developed a model of an asynchronous motor drive of a recycle compressor. This involved establishing a set of relay protections (RP) and developing the models of the following protections: sequence filter (symmetrical component filter) (SF), negative sequence (nps) O/C protection, and overload protection. It was demonstrated that the specified relay protection complex fully protects the motor from unbalanced operation conditions. The authors conducted a study of the protection complex operation under different supply voltage unbalances, with different motor loads. They formed a conclusion about the performance of the developed protection complex, and gave recommendations for its technical implementation in a business environment. The study findings can be used as a basis for the development and testing of relay protection components of the entire electrical system of the fuel hydrotreating unit at the Astrakhan Gas Refining Plant.

Keywords

asynchronous motor, unbalanced conditions of operation, unbalanced supply voltage, relay protection, structural simulation, sequence filter, negative sequence O/C protection, overload protection, Sepam1000+, Matlab, Simulink

For citation

Dmitrieva V.V., Khammatov A.B. Simulation of protection against unbalanced high-voltage asynchronous drive of recycle compressor in fuel hydrotreating unit. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(3):245–259. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-70>

Введение. Постановка задачи

В нефтегазовой промышленности большую роль играют непрерывные технологические процессы, например, нефте- и газопереработка, которые чувствительны к многим внешним факторам. Такие процессы требуют реализации специальных процедур для остановки и повторного пуска. Для наладки технологического процесса необходимы очистка всей системы от непрореагировавших компонентов и их удаление. Забракованное сырьё зачастую сбрасывается на факел, что влечет за собой ощутимые экологические проблемы и значительный экономический ущерб. Важную роль в обеспечении непрерывных технологических процессов в нефтегазовой промышленности играют

электротехнические системы (ЭТС), одним из ключевых элементов которых являются электродвигатели. Большую часть, не менее 80 %, используемых сегодня в промышленности электрических машин составляют асинхронные двигатели (АД). Обеспечение безаварийной их работы является одной из ключевых задач, что обеспечивает актуальность проектирования, моделирования и анализа действия систем релейных защит асинхронного двигателя, включая несимметричные режимы работы.

В данной статье рассматриваются проектирование и моделирование работы нескольких релейных защит от несимметричных режимов работы асинхронного двигателя [1]. Причинами возникновения



таких режимов могут быть как внешние, например, несимметрия подаваемого на двигатель напряжения [2], так и дефекты в самой машине. Если несимметрия возникает из-за изъянов в цепи ротора двигателя, то вращающий момент равен сумме моментов прямой M_1 и обратной M_2 последовательностей:

$$M(s) = M_1 + M_2, \quad (1)$$

и эта зависимость будет иметь провал при скольжении $s \approx 0,5$. Поскольку поле обратной последовательности неподвижно относительно статора, оно не создает в статоре токов и, следовательно, момент, обусловленный этим полем, будет равен нулю. При $0 \leq s \leq 0,5$ магнитное поле будет вращаться относительно статора в обратном направлении, а момент M_2 будет действовать на ротор в направлении движения. При $0,5 \leq s \leq 1$ поле вращается относительно статора в прямом направлении, а созданный этим полем момент M_2 будет действовать на ротор против направления вращения. При значительной несимметрии сопротивлений во вторичной цепи двигатель не достигнет нормальной частоты вращения. Максимально этот эффект проявляется при обрыве одной фазы ротора.

Если причиной несимметричного режима работы АД является несимметрия напряжений, подводимых к обмотке статора ($U_{AB} \neq U_{BC} \neq U_{CA}$), то не равны между собой будут и фазные напряжения ($U_A \neq U_B \neq U_C$). Влияние несимметрии [3] на работу асинхронного двигателя исследуется методом симметричных составляющих. При несимметричном питании из-за влияния обратной последовательности снижаются максимальный $M_{\max}$ и пусковой $M_{\text{пуск}}$ моменты двигателя и возрастает скольжение s при неизменном нагрузочном моменте. Кроме того, при питании двигателя несимметричным напряжением снижается КПД, увеличиваются потери, а следовательно, и нагрев двигателя, который влияет на срок службы изоляции обмоток. Например, при несимметрии напряжений в 2 % срок службы АД из-за дополнительных потерь активной мощности сокращается на 10 %. По этой причине при сильной несимметрии напряжения приходится снижать мощность двигателя. Из всего вышесказанного следует, что работа асинхронного двигателя при несимметричном питающем напряжении нежелательна, а исследование систем защит асинхронного двигателя является актуальной задачей.

В настоящее время в России показатели качества электрической энергии согласно национальному техническому стандарту ГОСТ 32144–2013 нормируются коэффициентом несимметрии по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательности. Для указанных показателей качества максимально допустимыми являются значения 2 % и 4 %, которые усреднены в интервале времени 10 мин в течение 95 % и 100 % времени на протяжении одной недели¹.

Описание объекта исследования

В качестве исследуемого объекта выбран асинхронный электропривод циркуляционного компрессора блока гидроочистки бензина в комбинированной установке гидроочистки топлив, расположенного на Астраханском газоперерабатывающем заводе (АГПЗ). Исследование несимметричных режимов работы двигателя рационально вести на мощных двигателях, так как влияние несимметрии в таком случае будет выражено лучше.

Установка гидроочистки предназначена для гидроочистки 2 млн т/год прямогонной широкой бензиновой фракции НК-180 °С (с возможным утяжелением конца кипения до 230 °С), вырабатываемой из астраханского газоконденсата, широкой фракции лёгких углеводородов (ШФЛУ) и бензина-отгона с блока гидроочистки дизельной фракции. Количество часов работы блока – 8000 ч в год. Режим работы блока – непрерывный. Технологическая схема процесса гидроочистки бензина представлена на рис. 1. Технологической схемой блока гидроочистки бензина предусматривается:

- гидроочистка исходного сырья на алюмо-кобальт-молибденовом катализаторе;
- холодная сепарация газосырьевой смеси;
- стабилизация гидрогенизата;
- газовоздушная регенерация катализатора;
- очистка водородсодержащего газа и углеводородного газа диэтаноломином;
- ингибиторная защита от коррозии.

На рис. 1 указаны основные технологические узлы процесса – реактор, колонны-стабилизаторы, механические фильтры, насосы, теплообменники, сепараторы, емкости для хранения (Е-306). Направление движения фракции бензина НК-180 указано стрелками. Исследуемым узлом является **циркуляционный компрессор**, который нагнетает водородсодержащий газ для получения газосырьевой смеси, которая затем проходит различные технологические циклы – нагрев, гидрирование, стабилизацию, охлаждение, и полученный в результате гидрогенизат выводится за пределы установки.

Управление технологическими процессами блока гидроочистки бензина и промпарком блока гидроочистки бензинов с насосной осуществляется с единого рабочего места оператора-технолога автоматизированной системой управления (АСУ ТП). АСУ ТП представляет собой иерархический многофункциональный промышленный, проектно-компонруемый программно-технический комплекс (ПТК) на базе микропроцессорных средств с модульной архитектурой [4]. Система обеспечивает оперативный контроль и управление всеми технологическими операциями установки, сбор, накопление, обработку и отображение информации о ходе технологического процесса, стабилизацию основных параметров, сигнализацию работы оборудования и положения арматуры, блокировку и защиту установки от аварийных ситуаций, аварийную сигнализацию, диагностику неисправности технических средств.

¹ ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Изд-во Стандартов; 2014. 15 с.

Система электроснабжения блока гидроочистки бензина включает в себя распределительный пункт, схема которого представлена на рис. 2. Схема включает в себя:

- ЦК-1, ЦК-2 – циркуляционные компрессоры ВСГ 2ГЦ2-47/35-44М УХЛ4 (в комплекте с панелью управления сухими газодинамическими уплотнениями 1000/TF/LB/D00908). В качестве приводов установлены асинхронные электродвигатели 4 АЗМП-2000/6000 УХЛ4 ($U_{\text{ном}} = 6000 \text{ В}$; $P_{\text{ном}} = 2000 \text{ кВт}$; $n = 3000 \text{ об/мин}$; взрывозащита IExdIIBT4);

- Н-1/1, Н-1/2, Н-1/3 – насосы центробежный нефтяной с плоским разъемом корпуса секционный 1НПС-Е200/700. В качестве приводов установлены асинхронные электродвигатели ИВАО-560S-4Y2,5-Т. Перерабатываемый продукт – бензиновая фракция. Данные насосы служат для подачи бензиновой фракции на блок гидроочистки;

- УК-1 – конденсаторная установка ($U_{\text{ном}} = 6000 \text{ В}$; $Q = 450 \text{ кВАр}$) предусмотрена в схеме для компенсации реактивной мощности, выделяемой на электродвигателях ЦК-1(ЦК-2);

- 1Т, 2Т – силовые двухобмоточные трёхфазные трансформаторы ТСЗЛ-1600/6/0,4 для питания низковольтной нагрузки трансформаторной подстанции.

Методы исследования

Для исследования работы асинхронного двигателя при несимметричных режимах воспользуемся математическим моделированием, в качестве моделирующей программы будем использовать пакет программ *Matlab* [5, 6]. При составлении математической модели АД будем традиционно использовать метод симметричных составляющих [7].

Наиболее актуальным способом защиты электродвигателей является разработка технических средств

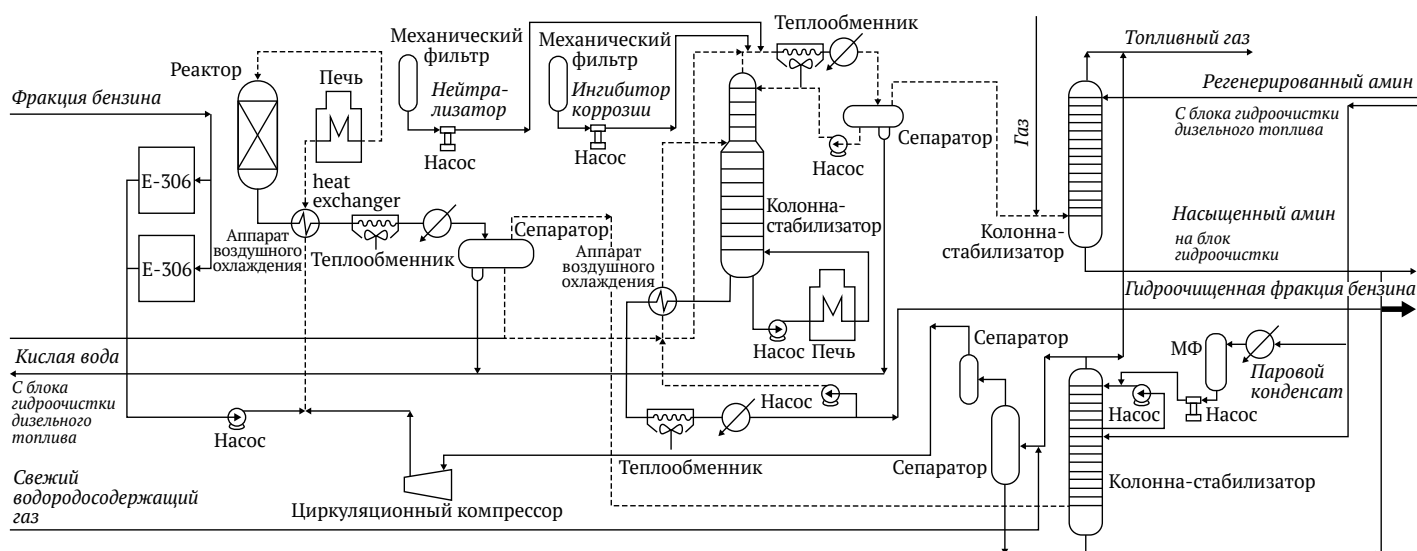


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема установки гидроочистки бензиновой фракции

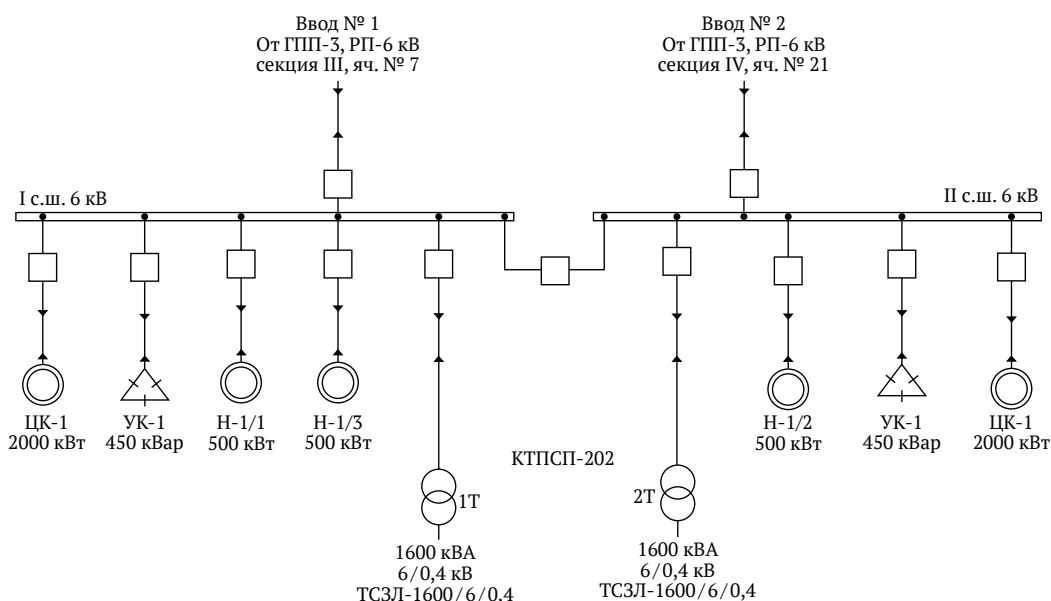


Рис. 2. Схема электроснабжения блока гидроочистки бензина



защиты [8], для оценки которых рассматриваются сложность их конструкции, экономичность, точность действия и надёжность. Для того чтобы избежать технологического ущерба, связанного с несимметричным режимом работы асинхронного двигателя, необходимо применять различные способы защиты [9, 10], а поскольку рассматриваемый ненормальный режим работы будет влиять не только на двигатель, но и на саму защиту, то защиты должны обладать высоким уровнем надёжности [10, 11]. Способы защиты электродвигателей от повреждений при несимметричных режимах работы можно условно разделить на: профилактические и технические, подразумевающие разработку и внедрение современных средств защиты, выполненных на микропроцессорной базе [12, 13].

Для защиты электродвигателей от несимметричных и неполнофазных режимов могут использоваться устройства косвенного типа, срабатывающие при превышении температуры статорных обмоток (устройства встроенной температурной защиты, УВТЗ, фазочувствительная защита, ФЗ) и прямого действия, реагирующие на появление обратной или нулевой последовательности напряжения или тока [14, 15].

Так как косвенные защиты реагируют не на саму асимметрию, а на её следствие, их работа характеризуется большой погрешностью срабатывания, низкими надёжностью и быстродействием. Другими недостатками этих защит являются сложные схемы, большие массогабаритные данные и высокая стоимость. В связи с этим более перспективными являются устройства прямого действия – специальные устройства защиты на базе фильтров симметричных составляющих.

Устройства защиты АД от несимметрии питающего напряжения могут строиться на базе фильтров нулевой и обратной последовательности и реагировать на несимметрию токов или напряжений.

Рассмотрим достоинства и недостатки релейной защиты, выполненной на токовых реле. Токовые защиты с фильтрами обратной и нулевой последовательностей реагируют на все несимметричные режимы. Данные устройства контролируют ток, протекающий по фазным цепям статора, поэтому срабатывание защит, выполненных на их базе, не зависит от места подключения. Однако использование трансформаторов тока уменьшает надёжность защиты, увеличивает энергопотребление и массогабаритные показатели. Кроме того, из-за насыщения сердечника трансформаторов защиты имеют недостаточную точность срабатывания [16]. Для повышения чувствительности токовых фильтровых защит используют защиты с торможением.

Если защита выполняется на реле напряжения, то следует учесть, что реле напряжения не обладают универсальностью, поскольку фиксируют только одно нарушение. Для защиты АД наиболее целесообразно применение так называемых мониторов напряжения, контролирующих несколько видов аварий. Реализуют такие мониторы на базе микропроцессорных устройств. Они универсальны, высоконадежны, просты, недороги и обеспечивают своевременное отключение электродвигателя при возникновении несимметрии и неполнофазных режимов [12, 17].

В настоящее время на рассматриваемом объекте для обеспечения защиты электрического оборудования внедряется микропроцессорная защита Seram 1000+ серии 80.

Рассмотрим возможности Seram 1000+ в области защиты от несимметричных режимов питания. Для защиты АД от перегрузок, вызванных несимметричным напряжением сети, используется защита минимального напряжения прямой последовательности $U^{(1)}$. Эта защита срабатывает, когда составляющая $U^{(1)}$ системы трехфазного напряжения становится меньше рассчитанной уставки срабатывания защиты U_{c3} . Защита от небаланса фаз реализуется путем измерения $U^{(2)}$. Выдержка времени у обеих защит – независимая.

Seram 1000+ для реализации данных защит работает на линейном или на фазном напряжении и позволяет отстроиться по коэффициенту несимметрии [14] по обратной последовательности

$$K_{2U} = \frac{U^{(2)}}{U^{(1)}} 100\%.$$

Для обеспечения защиты от несимметрии установлены уставки по коэффициенту обратной последовательности и по времени: $K_{2U} = 20\%$ и $t = 10$ с. К токовым защитами, диагностирующим несимметричный режим работы, относятся максимальная токовая защита обратной последовательности, защита от перегрузки и тепловая защита. МТЗ обратной последовательности в соответствии с током обратной последовательности выдает значение коэффициента небаланса. Защита имеет зависимую и независимую выдержки времени. Защита от перегрузки и тепловая защита предназначены для защиты двигателя от перегрузок, которые могут быть вызваны несимметричной нагрузкой в рабочих режимах или ненормальными режимами сети. Стоит отметить, что они диагностируют последствия несимметрии, а не её саму, и, следовательно, являются менее точными.

Диапазон выбора уставок данных защит представлен в табл. 1².

Таблица 1

Диапазон уставок защит Seram 1000+ серии 80

Функция защиты	Диапазон уставок	Диапазон выдержки времени, с
Защита от несимметричного режима питающего напряжения	$K_{2U} = 0 \div 50\%$	0,05–300
МТЗ обратной последовательности с независимой Δt	22,3–1130 А	0,1–300
МТЗ обратной последовательности с зависимой Δt	22,3–1130 А	0,1–1
Защита от перегрузки с независимой Δt	1–6250 А	0,05–300
Защита от перегрузки с зависимой Δt	1–6250 А	0,1–12,5 для 2260 А
Тепловая защита	60–200°C	1–600 мин

² Руководство по установке и применению Seram 1000 + серии 80.



Разработка модели асинхронного двигателя и моделей средств его РЗ от несимметричного режима работы в пакете Matlab Simulink

Для моделирования АД воспользуемся блоком Asynchronous Machine в пакете Matlab Simulink [18]. Паспортные данные двигателя 4АЗМ-2000/6000 УХЛ4 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Паспортные данные двигателя
4АЗМ-2000/6000 УХЛ4

Мощность, кВт	2000
Частота вращения, об/мин	2973
Масса, кг	5600
Ток статора, А	226
Скольжение, %	0,9
КПД	96,7
Коэффициент мощности, о.е.	0,88
Краткость максимального вращающего момента	1,9
Краткость пускового вращающего момента	0,77
Краткость пускового тока	4,7

Основываясь на паспортных данных двигателя, рассчитаем значения параметров модели двигателя в пакете Matlab Simulink по методике, изложенной в [19], полученные параметры, нужные для моделирования, представим в табл. 3.

Таблица 3

Параметры модели двигателя
4АЗМ-2000/6000 УХЛ4 в Simulink

Приведённое активное сопротивление ротора, Ом	0,419724
Активное сопротивление статора, Ом	0,888812
Приведённая индуктивность рассеяния статора и ротора, Гн	0,003531
Индуктивность цепи намагничивания, Гн	0,127834
Момент инерции, кг·м ²	187,07

Модель защиты асинхронного двигателя от несимметричных режимов питающего напряжения основывается на существующей защите Seram 1000+. Уставки защиты, которые должны будут быть отражены в модели, приведем в табл. 4. Для моделирования несимметричной работы двигателя и средств его защиты от несимметрии собрана схема в пакете Matlab Simulink, представленная на рис. 3.

Таблица 4

Уставки моделей защит в пакете Matlab Simulink

	Срабатывание защиты	Отпускание	t_{cp} , с
Защита на базе ФСС	$K_{2U} = 8 \%$	$K_{2U_0} = 6 \%$	10
Защита от перегрузки	$I_{c3} = 350 \text{ А}$	$I_0 = 300 \text{ А}$	18
МТЗ обратной последовательности	$I_{c3 \text{ обр посл}} = 60 \text{ А}$	$I_0 = 20 \text{ А}$	10

Пояснения по схеме моделирования асинхронного двигателя в Simulink:

1. Входное трехфазное напряжение формируется тремя однофазными источниками в виде элементов AC Voltage Source пакета SimPowerToolbox: амплитуда $A = 4898,98 \text{ В}$, частота $f = 50 \text{ Гц}$; начальная фаза: 0° для фазы А, -120° для фазы В и 120° для фазы С.

2. Асинхронный двигатель: задан блоком Asynchronous Machine. Параметры блока выбираются в соответствии с табл. 3. Крутящий момент задаётся блоками Signal Builder, Constant, Product1 для плавного пуска двигателя.

3. Трёхфазный выключатель: задан блоком Three-Phase Breaker. Управление данным блоком осуществляется по сигналу, сопротивления в разомкнутом и замкнутом положении ключа сохраняются по умолчанию 10^6 и 10^{-2} Ом соответственно.

4. Измерители тока и напряжения заданы блоками Current Measurement и Voltage Measurement.

5. Блоки RMS1-RMS4 предназначены для измерения действующего значения тока или напряжения.

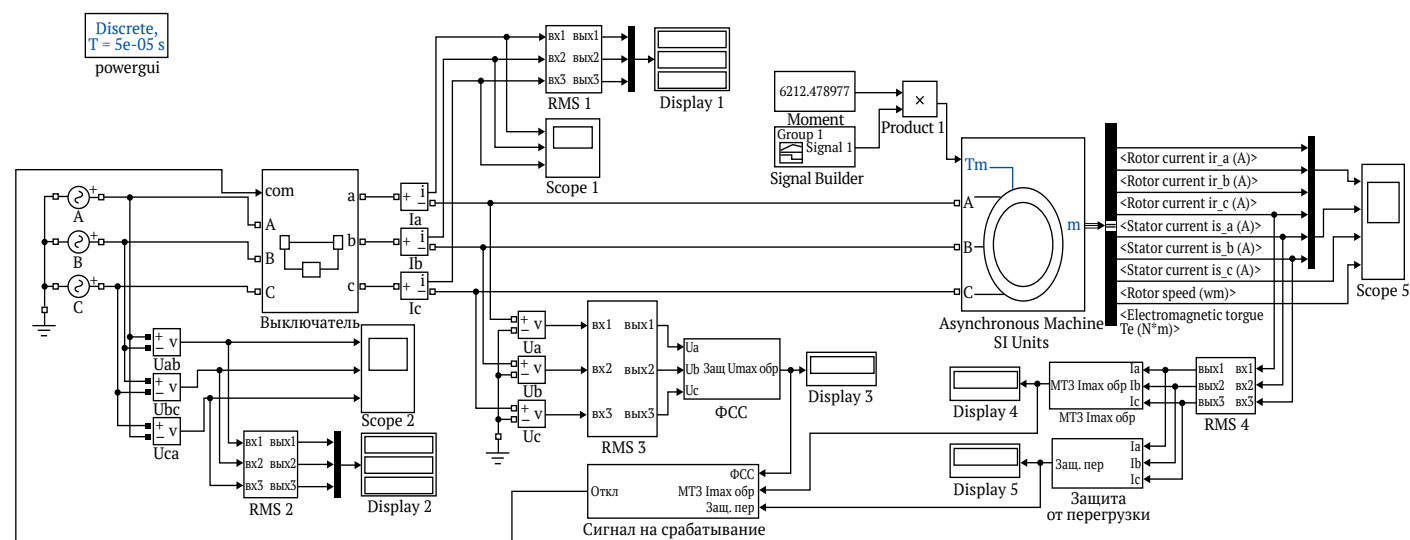


Рис. 3. Схема моделирования асинхронного двигателя в Simulink

6. Защита «фильтр-симметричных составляющих» (ФСС): входными величинами для блока являются действующие фазные напряжения, выходными – сигнал на срабатывание защиты и величина коэффициента несимметрии обратной последовательности по напряжению. Измеренные напряжения с помощью блока *Magnitude-Angle to Complex* переводятся в симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей. С помощью блока *Divide* производится вычисление K_{2U} , при превышении уставки, заданной блоком *Relay* $K_{2U} = 0,08$, с выдержкой времени 10 с подаёт сигнал на срабатывание защиты.

7. «МТЗ $I_{\max \text{ обр}}$ »: входными величинами являются действующие токи статора двигателя, выходным – сигнал на срабатывание. Аналогично ФСС, основываясь на измеренных линейных токах, получаем ток обратной последовательности, который сравнивается с уставкой, и при превышении уставки $I_{\text{ср}} = 60 \text{ A}$ с выдержкой времени 10 с подаёт сигнал на срабатывание защиты.

8. «Защита от перегрузки»: входными величинами являются действующие токи статора двигателя, выходным – сигнал на срабатывание. С помощью блока *MinMax* вычисляется максимальный действующий ток, который сравнивается с уставкой, и при превышении уставки $I_{\text{ср}} = 350 \text{ A}$ с выдержкой времени 18 с подаёт сигнал на срабатывание защиты.

9. «Сигнал на срабатывание»: входными величинами являются сигналы сработавших ФСС, «МТЗ $I_{\max \text{ обр}}$ » и защита от перегрузки, выходным – сигнал на срабатывание выключателя. С помощью блоков *Logical Operator 1–3* и *Monostable* производится размыкание выключателя, и так как это сопровождается отключением защит, не подается сигнал на включение двигателя, таким образом, не допускается заклинивание моделирования.

Внутренняя структура указанных выше блоков составлена в соответствии с алгоритмами действия защит. Для более компактного и лаконичного представления все вышеуказанные защиты заключены в блоки *Subsystem*. В качестве примера на рис. 4 при-

ведем схему защиты «Фильтр симметричных составляющих».

Верифицировать разработанную модель двигателя и схемы его защиты можно, имитируя номинальный режим. Моделируя работу двигателя в номинальном режиме, получим переходные процессы, совпадающие с эталонными процессами асинхронного двигателя по фазным токам, линейным напряжениям, токам ротора и статора, скорости вращения ротора и электромагнитному моменту двигателя.

1. Линейные токи во время пуска ($t = 0–8 \text{ с}$) примерно в 6 раз больше номинальных, что соответствует паспортным данным двигателя. Далее, когда двигатель выходит на номинальные частоты вращения, токи снижаются и выходят на номинальные значения $I_{\text{ном}} = 226 \text{ A}$.

2. Линейные напряжения, соответствующие номинальному значению, в течение всего времени моделирования $U_{\text{ном}} = 6000 \text{ В}$.

3. Сигналы, формируемые моделями защит, демонстрируют, что при номинальном режиме защиты не срабатывают, формируя на своих выходах сигнал 0, такому режиму соответствует 1 на выходе блока «сигнал на срабатывание», так как при подаче такого сигнала на выключатель он замкнут.

Проверим работоспособность установленных защит, рассмотрев их работу при ненормальных режимах работы двигателя. Проведенные авторами опыты показали, что при повышении момента нагрузки на 50 % происходит срабатывание защиты от перегрузки, при этом остальные защиты не срабатывают, так как не возникает токов и напряжений обратной последовательности. По временным диаграммам видно, что срабатывание защиты в момент времени $t = 18 \text{ с}$.

Рассмотрим работу защит при изменении напряжения в одной из фаз. При увеличении напряжения в фазе А на 20 % вместе с несимметрией напряжений наступает несимметрия токов, но при заданном отклонении уровень коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности $K_{2U} = 6,07 \% < K_{2U\text{max}} = 8 \%$ недостаточен, чтобы сра-

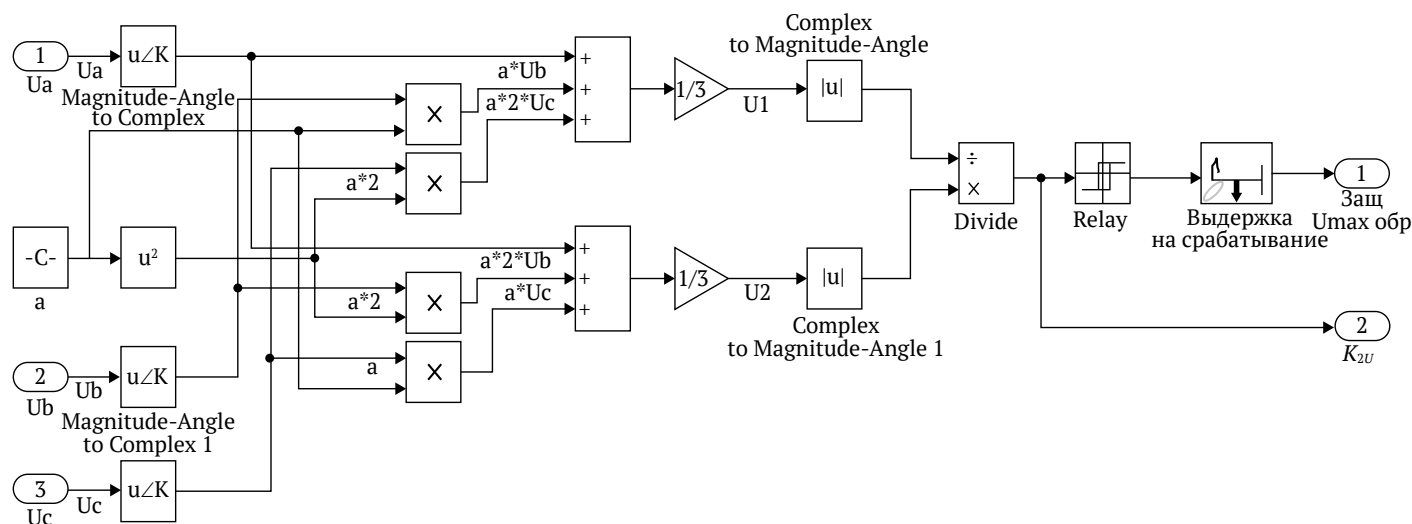


Рис. 4. Внутренняя структура блока ФСС



ботала соответствующая защита, но изменения токов достаточно, чтобы при пуске возник ток обратной последовательности, превышающий уставку МТЗ обратной последовательности $I_2 = 80 \text{ A} > I_{2\text{max}} = 60 \text{ A}$. По временным диаграммам видно, что срабатывание защиты в момент времени $t = 10 \text{ с}$. Защита от перегрузки не срабатывает, так как токи статора уменьшаются раньше уставки по времени $t = 18 \text{ с}$.

Если же напряжение в одной из фаз уменьшать, токи уменьшаются, но для того чтобы защита по напряжению обратной последовательности сработала, необходимо отклонение большее, чем 20 %. В данном случае $K_{2U} = 8,95 \% > K_{2U\text{max}} = 8 \%$, а следовательно, защита по несимметрии напряжения срабатывает, но при этом $I_2 = 50 \text{ A} < I_{2\text{max}} = 60 \text{ A}$, поэтому МТЗ обратной последовательности не срабатывает.

Мы видим, что защиты работают селективно и обеспечивают защиту двигателя от несимметричных режимов работы в пределах установленных уставок. Следовательно, разработанная цифровая модель позволяет исследовать работу двигателя при несимметричном питающем напряжении, а также диагностировать данные режимы с помощью защиты от перегрузки, МТЗ обратной последовательности и защиты на базе фильтра симметричных составляющих.

Результаты работы. Моделирование процессов при несимметричном питающем напряжении

Рассмотрим работу модели при несимметричном режиме питающего напряжения [20]. Варьируя напряжения в каждой фазе на величину $\Delta U = \pm 15 \% U_{\text{ном}}$, рассмотрим изменение токов и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} . Эти изменения напряжения представим на диаграмме на рис. 5. На этой диаграмме показан порядок изменения ΔU , %, в фазах при проведении 43 опытов. В легенде диаграммы разъяснено, каким цветом отображается каждая фаза. На этой же диаграмме представлено изменение коэффициента K_{2U} .

Далее на диаграмме на рис. 6 отобразим зависимость коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U} от отклонений напряжений в фазах.

На третьей диаграмме на рис. 7 представим зависимость токов в фазах двигателя I_a, I_b, I_c от несимметрии напряжений в фазах.

Интерес представляет также срабатывание промоделированных защит. Представим работу защит в табл. 5, в которой отобразим результаты наиболее показательной части опытов, тех, в которых защиты срабатывают.

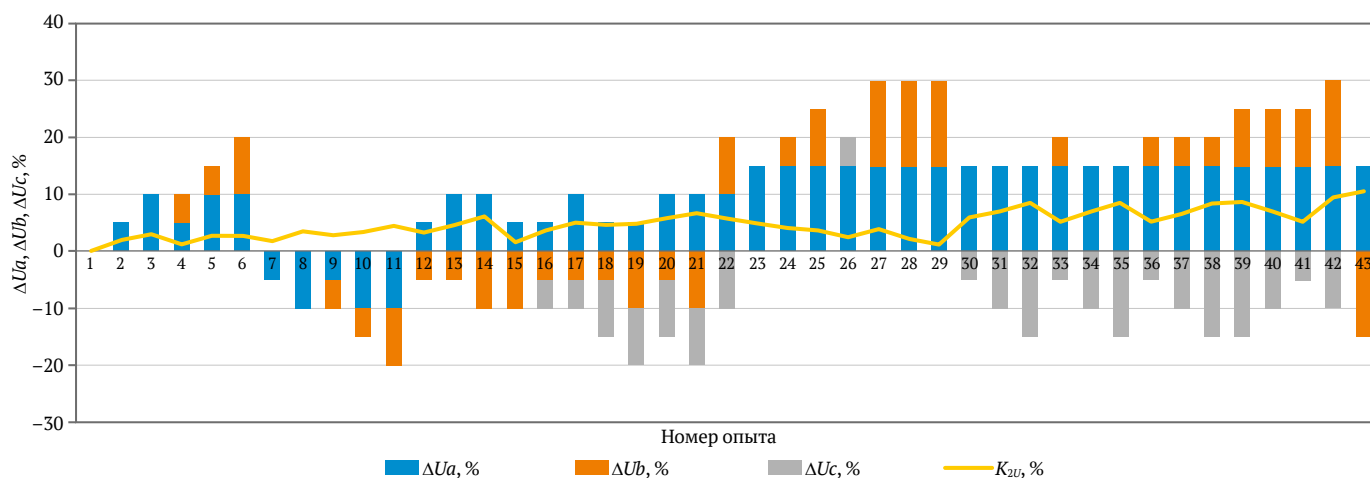


Рис. 5. Порядок изменения отклонений в фазах питающего напряжения

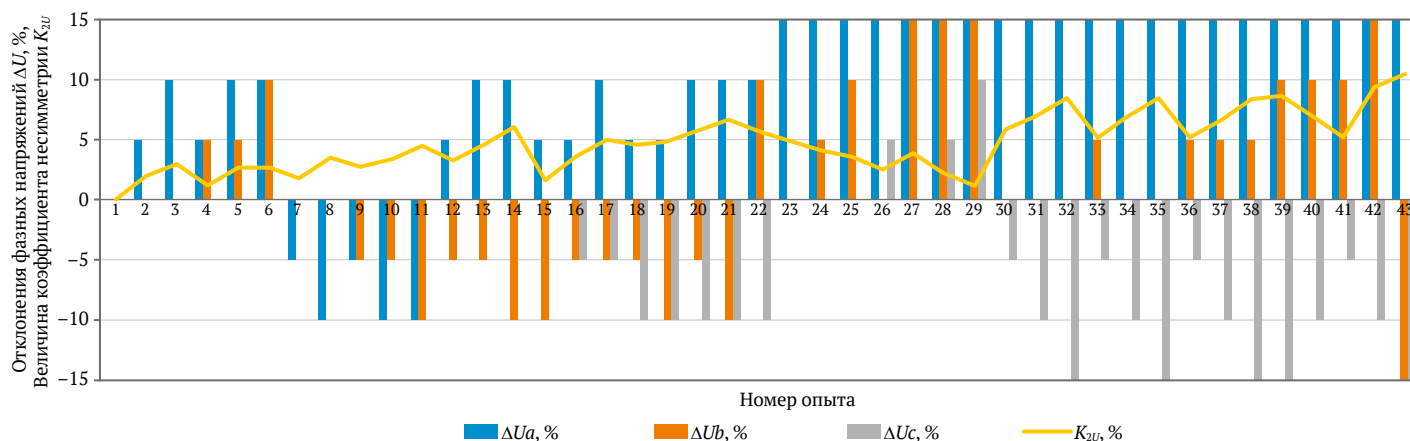


Рис. 6. Зависимость коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U} от отклонений напряжений в фазах ΔU , %

Анализ результатов

Пример результатов моделирования в Simulink приведен на рис. 8. По результатам моделирования видим, что при несимметричном режиме питающего напряжения чаще срабатывает МТЗ обратной последовательности. Это объясняется тем, что при изменении уровня напряжения даже в одной из фаз источника наблюдается изменение токов во всех фазах двигателя, что вызывает несимметрию токов и возникновение токов обратной последовательности [21]. При превышении тока обратной последовательности уровня уставки защиты с выдержкой времени происходит срабатывание защиты и питание отключается. По результатам моделирования можно заключить, что защита не всегда реагирует одинаково на одни и те же уровни несимметрии напряжения, например, при $K_{2U} = 4,9\%$ в одном случае ($\Delta U_a = 5\%$;

$\Delta U_b = 0\%$; $\Delta U_c = -10\%$) МТЗ обратной последовательности срабатывает, а в другом нет ($\Delta U_a = 15\%$; $\Delta U_b = 0\%$; $\Delta U_c = 0\%$). В случаях когда уровень несимметрии $K_{2U} > 5\%$, срабатывает МТЗ обратной последовательности, а при $K_{2U} > 8\%$ срабатывает также защита, выполненная на базе фильтра симметричных составляющих.

Проанализировав зависимость токов в фазах от коэффициента несимметрии, заметим, что значительная несимметрия токов возникает и при небольших значениях коэффициента несимметрии K_{2U} , а это означает, что для полноценной защиты двигателя помимо защиты на базе ФСС необходимо устанавливать МТЗ обратной последовательности, так как именно под действием токов обратной последовательности происходит нагрев двигателя, увеличиваются потери и вследствие этого уменьшается срок службы.

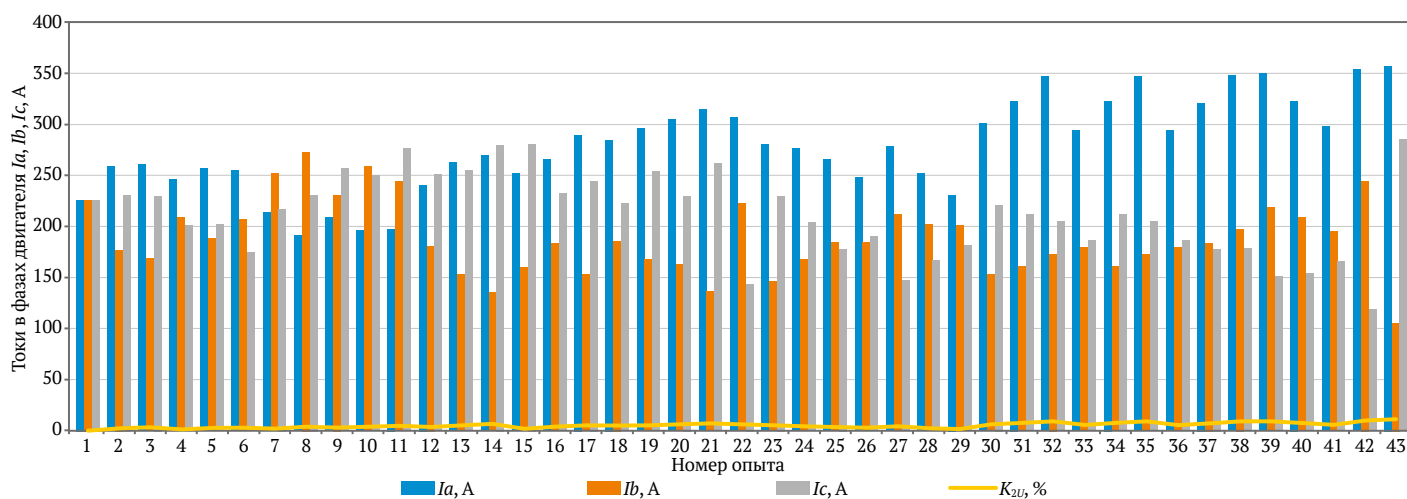


Рис. 7. Зависимость токов в фазах двигателя от коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U}

Таблица 5

Результаты моделирования работы АД при несимметричном питающем напряжении

Отклонения напряжений в фазах, %			Токи в фазах двигателя, А			K_{2U} , %	Срабатывающая защита
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c	I_a	I_b	I_c		
10	-10	0	270	136	280	6,1	МТЗ обр. посл.
5	-10	-10	296	168	254	4,9	МТЗ обр. посл.
10	-5	-10	305	163	230	5,8	МТЗ обр. посл.
10	-10	-10	315	137	262	6,7	МТЗ обр. посл.
10	10	-10	307	223	144	5,7	МТЗ обр. посл.
15	0	-5	301	153	221	5,9	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	323	161	212	7	МТЗ обр. посл.
15	0	-15	347	173	205	8,5	МТЗ обр. посл., ФСС
15	5	-5	294	180	186	5,2	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	323	161	212	7	МТЗ обр.
15	0	-15	347	173	205	8,5	МТЗ обр. посл., ФСС
15	5	-5	294	180	186	5,2	МТЗ обр. посл.
15	5	-10	321	184	178	6,6	МТЗ обр. посл.
15	5	-15	348	198	179	8,4	МТЗ обр. посл., ФСС
15	10	-15	350	219	151	8,7	МТЗ обр. посл., ФСС
15	10	-10	323	209	154	7	МТЗ обр. посл.
15	10	-5	298	195	166	5,2	МТЗ обр. посл.
15	15	-10	354	245	119	9,4	МТЗ обр. посл., ФСС
15	-15	-15	357	106	285	10,5	МТЗ обр. посл., ФСС

Теперь рассмотрим, как влияет несимметрия напряжений на токи в фазах двигателя при различных нагрузках на валу. Для этого будем изменять нагрузку от 0 до 120 %. Пример результатов для холостого хода, номинального режима и перегрузки представим в табл. 6–8.

Важно отметить, что при нагрузке на валу двигателя в 120 % от номинальной нагрузки при отклонениях напряжений в фазах *A*, *B*, *C* на -10, -10 и 0 % соответственно происходит срабатывание защиты от перегрузки, поскольку даже небольшая несимметрия напряжений при перегрузке вызывает токи, превышающие уставку защиты.

По данным таблиц видно, что при одинаковых изменениях напряжений в фазах токи имеют большую несимметрию при больших коэффициентах загрузки, поскольку в более нагруженном двигателе возникают большие токи, а при несимметричном питающем напряжении величина этих повышенных токов оказывает большее влияние на несимметрию токов, вызывая больший ток обратной последовательности, следовательно, несимметричные режимы питающего напряжения недопустимы при больших нагрузках двигателя.

Рассмотрим теперь скорость вращения ротора и вращающий момент, создаваемый двигателем при различных несимметричных режимах питающего

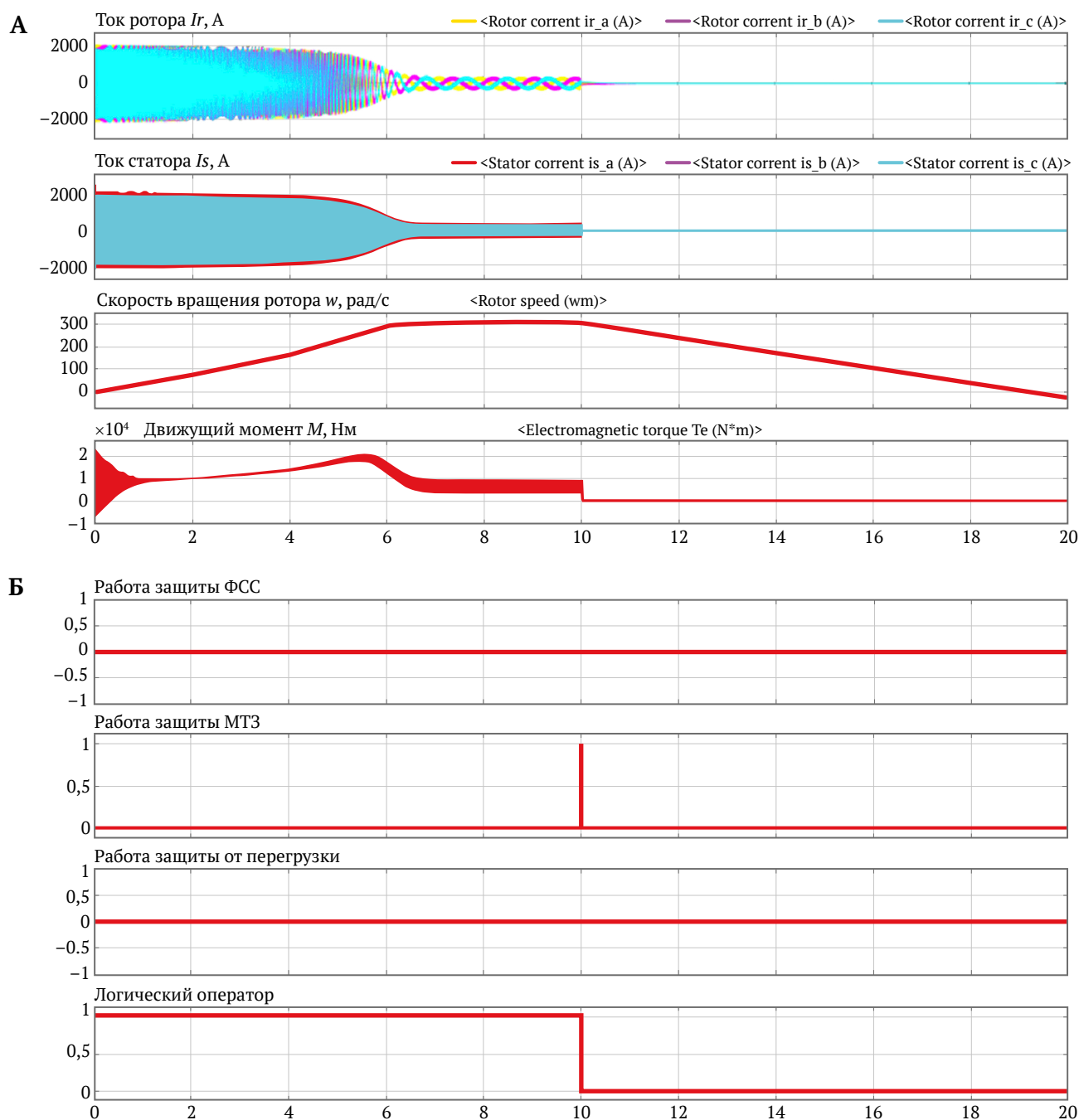


Рис. 8. Временные диаграммы: А – линейных токов ротора, токов статора, скорости вращения ротора и электромагнитного момента двигателя при увеличении напряжения фазы А на 20 %; Б – сигналов защит при увеличении напряжения фазы А на 20 %



напряжения в зависимости от времени. Исследовать будем работу двигателя с номинальной нагрузкой при изменении напряжения в фазах от номинального значения следующим образом:

1) отклонения напряжений в фазах: $\Delta U_a = 15\%$; $\Delta U_b = 10\%$; $\Delta U_c = 0\%$;

2) отклонения напряжений в фазах: $\Delta U_a = 10\%$; $\Delta U_b = 5\%$; $\Delta U_c = 0\%$;

3) отклонения напряжений в фазах: $\Delta U_a = -15\%$; $\Delta U_b = -5\%$; $\Delta U_c = 0\%$;

4) отклонения напряжений в фазах: $\Delta U_a = -10\%$; $\Delta U_b = 0\%$; $\Delta U_c = 0\%$.

В рассматриваемых режимах двигатель успевает выйти на устойчивый режим работы до срабатывания защиты от перегрузки, а МТЗ обратной последовательности и защита на базе ФСС не срабатывают, поэтому для более наглядного исследования рассматриваются токи статора и ротора, а также скорость вращения ротора и вращающий момент двигателя за 13 с моделирования. Результаты моделирования представлены в табл. 9. Пример графиков изменения токов ротора, токов статора, скорости вращения и вращающего момента асинхронного двигателя при рассматриваемых коэффициентах несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} представлены на рис. 9.

На представленных рисунках видно, что при нарушении симметрии питающего напряжения возникает несимметрия токов, а следовательно, и ток обратной последовательности, который нарушает нормальный режим работы двигателя, изменяя форму кривых токов статора и ротора, а также скоростей вращения ротора и вращающего момента двигателя, то есть создавая колебания этих величин. Возникшие колебания имеют большую амплитуду при большем коэффициенте несимметрии напряжения по обратной последовательности. Несимметричный режим напряжения негативно влияет на работу двигателя, так как при этом возникают колебания вращающего момента и скорости вращения ротора, в результате чего возникают вибрации, которые сокращают срок службы двигателя. Для более наглядного представления выведем на один график сигналы скорости вращения ротора и вращающего момента от параллельно работающих идентичных схем с различными соотношениями питающих напряжений, согласно табл. 9. Полученные графики изменения действующих значений скорости вращения и вращающего момента асинхронного двигателя при различных коэффициентах несимметрии напряжения по обратной последовательности представлены на рис. 10.

Таблица 6

Моделирование несимметричного режима работы двигателя при 100%-ной нагрузке

Отклонения напряжений в фазах, %			$K_{2U}, \%$	Токи в фазах двигателя, А			Срабатывание защиты
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c		I_a	I_b	I_c	
-10	-10	0	4	197,7	244,1	277,2	Защиты не срабатывают
10	-5	-10	6	304,8	162,8	229,9	МТЗ обр. посл.
15	0	-5	6	300,5	153,4	221,4	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	7	322,6	161,2	211,9	МТЗ обр. посл.
15	10	-15	9	350,2	219,1	151,0	МТЗ обр. посл., ФСС
15	-15	-15	11	356,9	106,0	285,2	МТЗ обр. посл., ФСС

Таблица 7

Моделирование несимметричного режима работы при нагрузке 0 %

Отклонения напряжений в фазах, %			$K_{2U}, \%$	Токи в фазах двигателя, А			Срабатывание защиты
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c		I_a	I_b	I_c	
-10	-10	0	4	81,6	23,5	117,7	Защиты не срабатывают
10	-5	-10	6	162,6	92,3	70,6	МТЗ обр. посл.
15	0	-5	6	178,4	120,3	58,8	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	7	192,8	145,6	56,4	МТЗ обр. посл.
15	10	-15	9	205,2	204,0	60,3	МТЗ обр. посл., ФСС
15	-15	-15	11	237,6	148,2	126,2	МТЗ обр. посл., ФСС

Таблица 8

Моделирование несимметричного режима работы при 120%-ной нагрузке

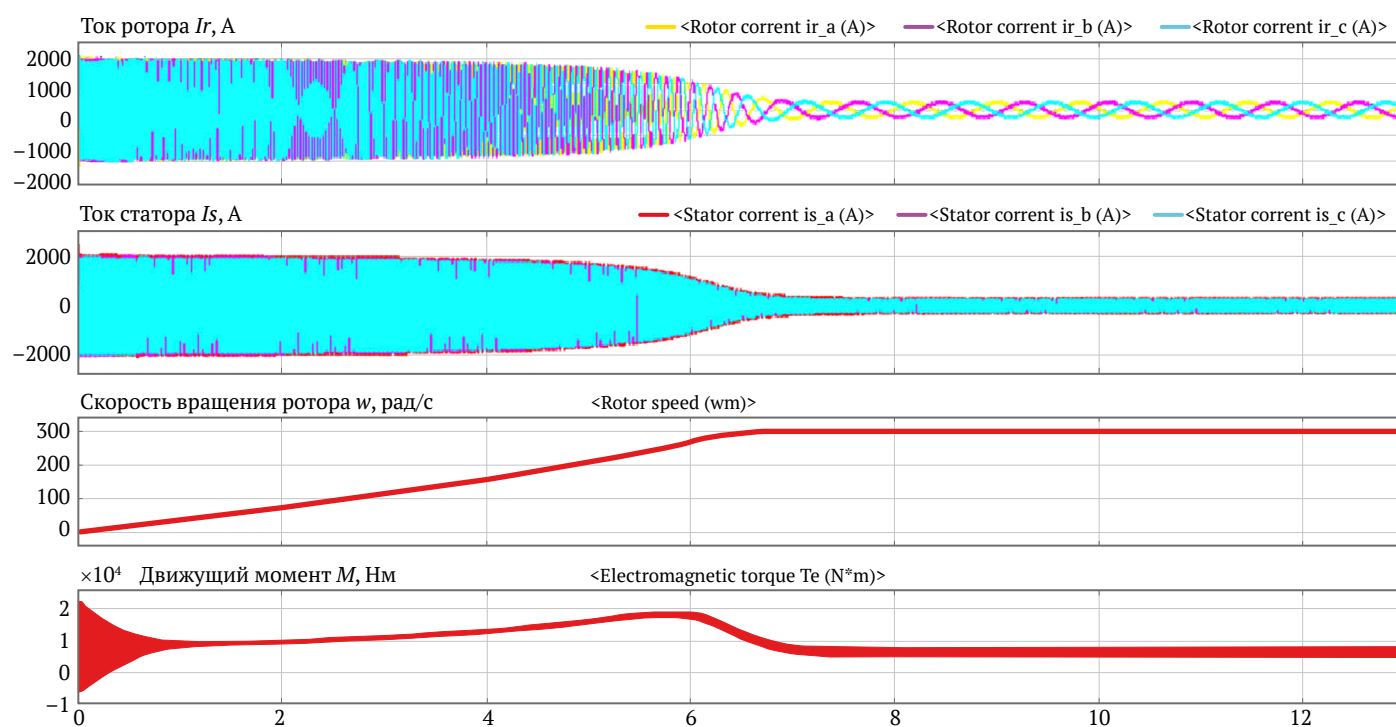
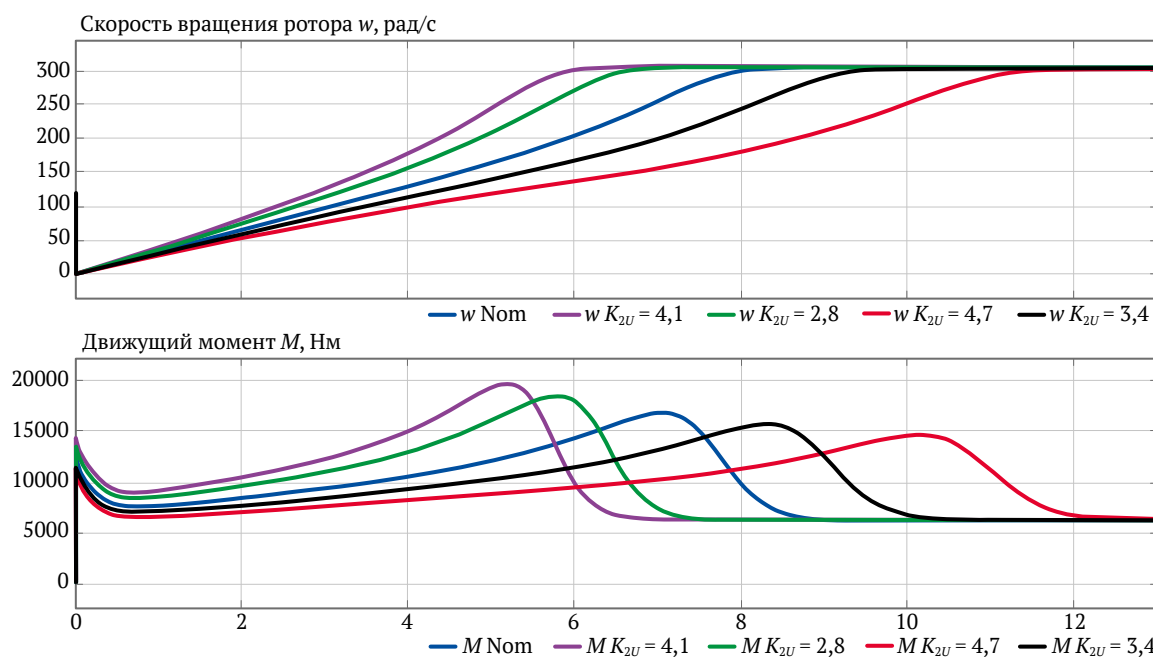
Отклонения напряжений в фазах, %			$K_{2U}, \%$	Токи в фазах двигателя, А			Срабатывание защиты
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c		I_a	I_b	I_c	
-10	-10	0	4	243,2	300,0	327,6	Защита от перегрузки
10	-5	-10	6	348,8	205,4	275,0	МТЗ обр. посл.
15	0	-5	6	341,6	192,2	261,7	МТЗ обр. посл.
15	0	-10	7	365,1	198,9	250,3	МТЗ обр. посл.
15	10	-15	9	383,5	245,4	188,6	МТЗ обр. посл., ФСС
15	-15	-15	11	396,2	148,6	333,6	МТЗ обр. посл., ФСС



Таблица 9

Результаты моделирования для исследования динамических характеристик двигателя

Отклонения напряжений в фазах, %			Фазные напряжения, В			Токи в фазах двигателя, А			Коэффициент несимметрии K_{2U} , %
ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c	ΔU_a	ΔU_b	ΔU_c	I_a	I_b	I_c	
15	10	0	5634	5389	4899	274,1	196,2	181,7	4,1
10	5	0	5389	5144	4899	257,9	196,6	203,4	2,8
-15	-5	0	4164	4654	4899	184,9	292,7	262	4,7
-10	0	0	4409	4899	4899	198	277,5	232,2	3,4

Рис. 9. Графики изменения токов ротора, токов статора, скорости вращения и вращающего момента АД при коэффициенте несимметрии напряжения по обратной последовательности $K_{2U} = 4,1$ %Рис. 10. Графики изменения действующего значения скорости вращения и вращающего момента АД при номинальном режиме работы ($K_{2U} = 0$ %) и коэффициентах несимметрии напряжения по обратной последовательности $K_{2U} = 4,1, 2,8, 3,4, 4,7$ %



На графиках видно, что изменения скорости вращения ротора и вращающий момент двигателя зависят не столько от коэффициента несимметрии, сколько от характера изменения напряжения. При пониженном напряжении пуск двигателя более затруднен, он медленнее выходит на номинальную скорость вращения. Сравним графики изменения вращающего момента при $K_{2U} = 0, 4, 7, 3, 4 \%$. Так как при нормальном режиме питающего напряжения $K_{2U} = 0 \%$, то момент обратной последовательности не возникает $-M_2 = 0$, и момент двигателя полностью определяется моментом прямой последовательности $-M_{\text{ном}} = M_1$. Для оценки влияния несимметричного напряжения на вращающий момент двигателя будем считать, что при $K_{2U} = 4, 7, 3, 4 \%$ вращающий момент прямой последовательности приблизительно равен моменту при номинальном режиме работы двигателя. Данное утверждение обосновывается тем, что уровень напряжения в рассматриваемых случаях несильно отличается от номинального, а следовательно, характер кривых зависит от этого в меньшей степени. Так как при несимметричном питающем напряжении возникают токи обратной последовательности, возникает и момент обратной последовательности, имеющий отрицательное значение $M_2 < 0$, следовательно, результирующий момент, равный сумме моментов прямой и обратной последовательности $-M = M_1 + M_2 = M_{\text{ном}} + M_2$, будет снижаться при большем коэффициенте несимметрии, что ярко выражено на максимумах рассматриваемых кривых. Аналогичное суждение справедливо и для изменения вращающих моментов при $K_{2U} = 4, 1, 2, 48 \%$, но так как в данном случае несимметрия напряжения вводилась путём увеличения напряжений в фазах, вместе с напряжением выросли и токи как прямой, так и обратной последовательности, что вызвало увеличение соответствующих моментов. В таком случае при большем коэффициенте несимметрии момент становится больше по сравнению с номинальным. В заключение можно сделать вывод, что изменение симметрии напряжения сопровождается уменьшением результирующего вращающего момента, а сле-

довательно, увеличением потерь и снижением КПД двигателя, а также нагревом обмоток в результате возникновения токов обратной последовательности.

Выводы

Авторами проведено исследование защит высоковольтного асинхронного электропривода циркуляционного компрессора в установке гидроочистки топлив Астраханского ГПЗ. Исследования показали, что для защиты двигателя от несимметрии питающего напряжения должны быть выбраны релейные защиты ФСС, защита обратной последовательности и защита от перегрузки. Было выполнено моделирование совместной работы АД и его защит. Результаты проведенного исследования позволяют количественно оценить влияние несимметрии питающего напряжения на работу высоковольтного асинхронного двигателя. Анализ работы совокупности защит показал, что при несимметрии напряжений чаще срабатывает МТЗ обратной последовательности, так как возникает несимметрия токов. Авторами сделан вывод, что именно эта защита должна быть предусмотрена обязательно, поскольку следствие несимметричных режимов питания – несимметрия токов – создаёт момент обратной последовательности, который уменьшает КПД двигателя и сокращает его срок службы. Оценка работы защит при различных коэффициентах загрузки двигателя показала, что влияние несимметрии напряжений оказывает большее влияние на работу двигателя при больших коэффициентах загрузки. Проведенный анализ характеристик двигателя при различных несимметриях питающего напряжения позволил оценить изменения действующих значений скорости вращения и момента двигателя при различных коэффициентах несимметрии. Подтверждена возможность реализации разрабатываемой системы РЗ на базе микропроцессорной защиты Seram 1000+ серии 80.

Практическое применение выполненной работы заключается в том, что она может быть положена в основу релейной защиты всех элементов ЭТС установки гидроочистки топлив на Астраханском ГПЗ. В настоящее время авторами ведется дальнейшая разработка этой системы.

Список литературы

1. Panchenko V., Turenko A. Analysis of the influence of voltage asymmetry on the operation of the traction asynchronous electric motor using the simulation model. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*. 2021;(198):145–150. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>
2. Романова В.В., Хромов С.В., Бахтурин А.Г., Суслов К. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022;24(4):131–141. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141>
3. Шакиров В.А., Сыровешкин А.М., Буянина О.А. Исследование влияния несимметрии напряжений на работу асинхронных двигателей. *Труды Братского государственного университета. Серия: естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири*. 2011;2:8–11.
4. Дмитриева В.В., Авхадиев И.Ф., Сизин П.Е. Использование современных программно-технических комплексов для автоматизации конвейерных линий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2):150–163. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-150-163>
5. Ершов Ю.А., Малеев А.В. Моделирование микропроцессорных релейных защит в среде MATLAB. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2010;3(2):220–228. URL: https://elibrary.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/1672/09_ershov.pdf?sequence=1



6. Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Суворов А.А. Математическое моделирование цифровой дифференциальной защиты трансформатора в среде Matlab Simulink. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(1):134–150. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-134-150>
7. Копылов И.П. *Математическое моделирование электрических машин*. М.: Высшая школа; 2001. 327 с.
8. Андреев В.А. *Релейная защита систем электроснабжения в примерах и задачах*. М.: Высшая школа; 2008. 256 с.
9. Hou L., Li B., Hu X., Liu Ch. Research on motor relay protection of high-voltage variable frequency motor drive system. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2014;4(4):330–335. <https://doi.org/10.1080/22348972.2014.11011892>
10. Kuprienko V.V. Relay protection features of frequency-adjustable electric drive. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;327(5):052021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052021>
11. Popa G.N., Duinis C.M. Complex electronic protection for low-voltage three-phase induction motors. *WSEAS Transactions on Electronics*. 2020;11:11–17. <https://doi.org/10.37394/232017.2020.11.2>
12. Полищук В.И., Крицкий М.В., Баннов Д.М., Малышев С.В. Применение унифицированных блоков микропроцессорной релейной защиты в задачах диагностики электрических машин. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019;21(6):93–100. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100>
13. Neftisov A.V., Sarinova A.Zh., Talipov O.M. Possibility of building microprocessor relay protection devices on open architecture. *Bulletin of Toraigyrov University. Energy Series* 2022;(3):277–292. <https://doi.org/10.48081/IKLZ1109>
14. Zeng Q., Zhang Zh., Xu M., Zhu J. A coordinated relay protection strategy of distribution network based on fault current limiting. *Energy Reports*. 2022;8(3):380–387. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.036>
15. Kholiddinov I.Kh., Misinova G., Yulchiev M.E., Tychiev Z.Z. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab). *The American Journal of Engineering and Technology*. 2020;2(10):33–37. <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume02Issue10-07>
16. Новобрицкий В.А., Федосов Д.С. Анализ работы устройств релейной защиты в переходном режиме, сопровождающемся насыщением трансформатора тока. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021;23(5):71–85. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-71-85>
17. Nedelchev N., Matsankov M. Increasing the sensitivity of the digital relay protection against turn-to-turn short circuits and asymmetries in wind power generators. In: *The 3rd International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE 2020)*. 2020;186(4):03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018603001>
18. Романова В.В., Хромов С.В. Построение компьютерной модели для исследования режимов работы асинхронного двигателя. В: *Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции «Развитие технических наук в современном мире». Вып. II. Воронеж, 08 декабря 2015 г.* Воронеж: Изд-во ИЦРОН; 2015. С. 35–38.
19. Пантель О.В. Методика расчета параметров асинхронного двигателя для моделирования режимов его работы в среде Matlab/Simulink. *Academy*. 2015;(2):7–11.
20. Немыкина В.В., Рябченко Н.Л., Алексеева Т.Л., Астраханцев Л.А. Анализ несимметрии токов и напряжений в обмотках статора асинхронных двигателей привода вспомогательных машин. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2020;(4):85–92. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.4\(68\).85-92](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.4(68).85-92)
21. Суворов И.Ф., Сидоров А.И., Хромов С.В. Исследование влияния несимметрии линейных напряжений в сетях напряжением до 1000 В на режимы работы асинхронных электродвигателей. *Электробезопасность*. 2014;(3):17–30.

References

1. Panchenko V., Turenko A. Analysis of the influence of voltage asymmetry on the operation of the traction asynchronous electric motor using the simulation model. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport*. 2021;(198):145–150. (In Ukrainian) <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256648>
2. Romanova V.V., Khromov S.V., Batukhtin A.G., Suslov K.V. Analysis of the degree of influence of supply voltage asymmetry on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2022;24(4):131–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141>
3. Shakirov V.A., Syrovoshkin A.M., Buyanina O.A. Study of the effect of voltage unbalance on the operation of asynchronous motors. *Trudy Bratskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Estestvennye i Inzhenernye Nauki – Razvitiyu Regionov Sibiri*. 2011;(2:8):11. (In Russ.)
4. Dmitrieva V.V., Avkhadiev I.F., Sizin P.E. Use of advance hardware/software in multiple conveyor system automation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2):150–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-2-0-150-163>
5. Ershov Yu.A., Maleev A.V. Microprocessor Relay Protection Modeling in MATLAB. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2010;3(2):220–228. (In Russ.) URL: https://elibrary.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/1672/09_ershov.pdf?sequence=1



6. Andreev M.V., Ruban N. Yu., Suvorov A.A. Mathematical modeling of digital differential transformer protection in Matlab Simulink environment. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(1):134–150. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-1-134-150>
7. Kopylov I.P. *Mathematical modeling of electric machines*. Moscow: Vysshaya Shkola; 2001. 327 p. (In Russ.)
8. Andreev V.A. *Relay protection of power supply systems in examples and tasks*. Moscow: Vysshaya Shkola; 2008. 256 p. (In Russ.)
9. Hou L., Li B., Hu X., Liu Ch. Research on motor relay protection of high-voltage variable frequency motor drive system. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2014;4(4):330–335. <https://doi.org/10.1080/22348972.2014.11011892>
10. Kuprienko V.V. Relay protection features of frequency-adjustable electric drive. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;327(5):052021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052021>
11. Popa G.N., Duinis C.M. Complex electronic protection for low-voltage three-phase induction motors. *WSEAS Transactions on Electronics*. 2020;11:11–17. <https://doi.org/10.37394/232017.2020.11.2>
12. Polishchuk V.I., Kritsky M.V., Bannov D.M., Malyshev S.V. Application of unified microprocessor relay protection units in electrical machine diagnostics. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2019;21(6):93–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-6-93-100>
13. Neftisov A.V., Sarinova A.Zh., Talipov O.M. Possibility of building microprocessor relay protection devices on open architecture. *Bulletin of Toraigyrov University. Energy Series* 2022;(3):277–292. <https://doi.org/10.48081/IKLZ1109>
14. Zeng Q., Zhang Zh., Xu M., Zhu J. A coordinated relay protection strategy of distribution network based on fault current limiting. *Energy Reports*. 2022;8(3):380–387. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.08.036>
15. Kholiddinov I.Kh., Misinova G., Yulchiev M.E., Tuychiev Z.Z. Modeling of calculation of voltage unbalance factor using Simulink (Matlab). *The American Journal of Engineering and Technology*. 2020;2(10):33–37. <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume02Issue10-07>
16. Novobritsky V.A., Fedosov D.S. The main types of wind turbines-generators in the power supply system. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021;23(5):71–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-71-85>
17. Nedelchev N., Matsankov M. Increasing the sensitivity of the digital relay protection against turn-to-turn short circuits and asymmetries in wind power generators. In: *The 3rd International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE 2020)*. 2020;186(4):03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018603001>
18. Romanova V.V., Khromov S.V. Construction of a computer model to study the operating regimes of an asynchronous motor. In: *Collection of scientific papers based on the results of the international scientific-practical conference "Development of Technical Sciences in the Modern World". Vol. II. Voronezh, December 8, 2015. Voronezh: ITsRON Publishing House; 2015. Pp. 35–38. (In Russ.)*
19. Pantel O.V. Asynchronous motor parameters calculation methodology for simulation of its operating regimes in Matlab/Simulink environment. *Academy*. 2015;(2):7–11. (In Russ.)
20. Nemykina V.V., Ryabchenok N.L., Alekseeva T.L., Astrakhantsev L.A. Analysis of current and voltage unbalance in stator windings of asynchronous motors of the auxiliary machine drive. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2020;(4):85–92. (In Russ.) [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.4\(68\).85-92](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2020.4(68).85-92)
21. Suvorov I.F., Sidorov A.I., Khromov S.V. Investigation of the effect of unbalanced line voltages in networks up to 1000 V on the modes of induction motors. *Electrical Safety*. 2014;(3):17–30. (In Russ.)

Информация об авторах

Валерия Валерьевна Дмитриева – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической электротехники и электрификации, нефтяной и газовой промышленности, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-8740-9380](https://orcid.org/0000-0002-8740-9380), Scopus ID [56007868500](https://orcid.org/56007868500); e-mail dm-valeriya@yandex.ru

Алдияр Беимбетович Хамматов – магистрант кафедры теоретической электротехники и электрификации, нефтяной и газовой промышленности, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0009-0007-6286-6845](https://orcid.org/0009-0007-6286-6845); e-mail khammatov.aldik@mail.ru

Information about the authors

Valeria V. Dmitrieva – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-8740-9380](https://orcid.org/0000-0002-8740-9380), Scopus ID [56007868500](https://orcid.org/56007868500); e-mail dm-valeriya@yandex.ru

Aldiyar B. Khammatov – Master Student of the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russian Federation; ORCID [0009-0007-6286-6845](https://orcid.org/0009-0007-6286-6845); e-mail khammatov.aldik@mail.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022
Поступила после рецензирования 27.03.2023
Принята к публикации 28.03.2023

Received 25.12.2022
Revised 27.03.2023
Accepted 28.03.2023