

Совершенствование реагентных режимов флотации руд сложного вещественного состава

Чжо Зай Яа^{1,2}, А.А. Семикин², Д.Г. Сандакова²✉, А.А. Дехтяренко², В.А. Якимов³

¹ Научно-технический исследовательский центр Пин У Львин, Мандалай, Мьянма

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация

³ Государственный университет «Дубна», Московская область, г. Дмитров, Российская Федерация

✉ dsandakova@inbox.ru

Резюме: Руды сложного вещественного состава (медно-цинковые) России являются комплексным и труднообогатимым минеральным сырьем. Основной технологией обогащения таких руд является флотация. В настоящее время совершенствование технологии флотации такого минерального сырья проводится по нескольким направлениям. Практикой обогащения медно-цинковых руд установлено, что получение качественных цинковых и пиритных концентратов невозможно без использования в практике флотации сфалерита и пирита различных модификаторов. В качестве таких реагентов выступают сульфаты меди (II), цинка и железа (II) в щелочной известковой среде. Поэтому были выполнены исследования флотуемости сфалерита и пирита в щелочной известковой среде с добавлением в операцию флотации минерала одного из указанных сульфатов. Влияние каждого из сульфатов меди (II), цинка и железа (II) на флотуемость сфалерита и пирита было изучено при флотации минерала с бутиловым ксантогенатом при pH 8, 10 и 12. Целью работы являлось исследование влияния сульфгидрильных собирателей в присутствии сульфатов меди, цинка и железа на флотацию сфалерита и пирита классом крупности (–0,074 + 0,044 мм) с одного из российских месторождений.

Ключевые слова: флотация, сфалерит, сульфат железа, бутиловый ксантогенат калия, термодинамика, термодинамический потенциал Гиббса, электрохимический потенциал, минеральный электрод

Для цитирования: Чжо Зай Яа, Семикин А.А., Сандакова Д.Г., Дехтяренко А.А., Якимов В.А. Совершенствование реагентных режимов флотации руд сложного вещественного состава. *Горная промышленность*. 2024;(3):100–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-100-104>

Enhancement of reagent regimes for complex ores flotation

Z.Y. Kyaw^{1,2}, A.A. Semikin², D.G. Sandakova²✉, A.A. Dekhtyarenko², V.A. Yakimov³

¹ Science and Technological Research Center Pyin Oo Lwin, Mandalay, Myanmar

² National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

³ State University "Dubna", Moscow region, Dmitrov, Russian Federation

✉ dsandakova@inbox.ru

Abstract: Pyrite copper-zinc (sulfide) and polymetallic ores in Russia are complex and rebellious mineral raw materials. The main processing technology for such ores is flotation. Enhancement of the flotation technology for such mineral raw materials is currently performed in several directions. The practice of copper-zinc ore processing proves that obtaining high-quality zinc and pyrite concentrates is impossible without the use of various modifiers in the sphalerite and pyrite flotation process. Such reagents are copper (II), zinc and iron (II) sulfates in the alkali-calcic medium. Therefore, research was carried out to study floatation properties of sphalerite and pyrite in the alkali-calcic medium with addition of one of the indicated sulfates to the mineral flotation process. The effect of each of the sulfates of copper (II), zinc and iron (II) on the flotation properties of sphalerite and pyrite was studied during flotation of the mineral with butyl xanthate and dithiophosphate at pH equal to 8, 10, and 12. The aim of this work was to study the effect of the sulfhydryl collectors in presence of copper sulfates, zinc and iron for flotation of sphalerite and pyrite with the grain-size class of 0.074 + 0.044 mm from one of the Russian deposits.

Keywords: flotation, sphalerite, ferrous sulfate, potassium butyl xanthate, sodium butyldithiophosphate, thermodynamics, Gibbs thermodynamic potential, electrochemical potential, mineral electrode

For citation: Kyaw Z.Y., Semikin A.A., Sandakova D.G., Dekhtyarenko A.A., Yakimov V.A. Enhancement of reagent regimes for complex ores flotation. *Russian Mining Industry*. 2024;(3):100–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3-100-104>

Введение

Процессы в горнодобывающей промышленности последовательны и взаимосвязаны [1–6]. Неверные решения влекут за собой снижение качества продукции и требуют дополнительных затрат для получения требуемого качества [7–9].

Применяемые реагенты в процессе обогащения при попадании в окружающую среду представляют серьезную опасность [10; 11]. Для достижения устойчивого развития горного региона необходимо использование техногенных отходов в замкнутом цикле основного и вспомогательно-го производств [12–15].

При обогащении необходимы строгий контроль размера зерен в рудном материале [16] и строгое управление процессом пенообразования [17]. Процесс пенообразования обычно требует использования множества химических реагентов, включая собиратели, пенообразователи, поверхностные модификаторы и регуляторы pH и др. [18]. Флотационные реагенты используются для обработки поверхности руд с целью повышения эффективности разделения компонентов [19]. Реагенты могут влиять на химический состав пульпы и превращать флотацию в сложную систему, включающую взаимодействие всех добавок (включая собиратели, депрессанты, активаторы, регуляторы pH и пенообразователи) [20]. Фундаментальные знания о химических реагентах, разработка новых типов, использование их для различных условий, а также исследования минералов и химии поверхности в присутствии различных реагентов являются важными проблемами в переработке минералов [21; 22].

Изучению действия указанных классов сульфгидрильных собирателей на флотацию сульфидных минералов, а также исследованиям, направленным на совершенствование технологии флотации медно-цинковых и полиметаллических руд, посвящены работы авторов, что свидетельствует об актуальности проблемы исследования.

Оборудование и методики исследований

При выполнении экспериментальной части работы применялось несколько методик приготовления материалов и реагентов, использовались разнообразные аппараты и оборудование, а также способы анализа и обработки результатов.

В качестве собирателей при флотации сфалерита и пирита в работе были использованы бутиловый ксантогенат калия и бутиловый дитиофосфат натрия.

MLA анализ минеральных проб

В нашей работе изучение вещественного и гранулометрического состава сфалерита проводилось с использованием комплекса MLA System Quanta. Комплекс позволяет анализировать пробы продуктов переработки минерального сырья с возможностью качественного и количественного определения минералов, металлов и примесей.

С помощью системы MLA можно получить следующие результаты: минералогический и химический состав образцов, распределение по размерам частиц и зерен; информацию о минеральных ассоциациях, раскрытых и в сростках; средние плотности частиц и факторы формы; теоретические кривые «содержание – извлечение».

На рис. 1 представлен структурный анализ исследуемой пробы сфалерита и пирита: а – образец представлен в основном сфалеритом ZnS и редкими включениями

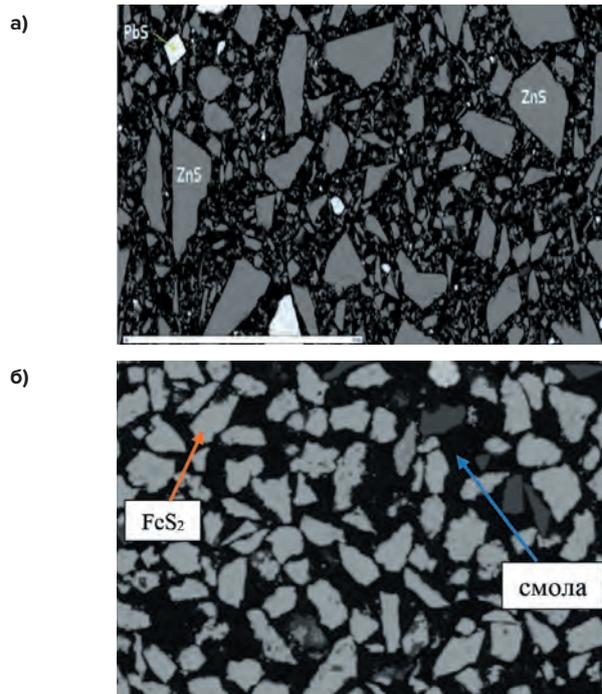


Рис. 1
Анализ исследуемой пробы сфалерита и пирита

Fig. 1
Analysis of the investigated sphalerite and pyrite sample

галенита PbS; и фото б – представлен брикет пирита FeS₂ в эпоксидной смоле.

Подготовка сфалерита и пирита к флотации

Пробу сфалерита и пирита дробили в лабораторной щековой дробилке до крупности – 5 + 0 мм, после чего проводили сухое измельчение в фарфоровой шаровой мельнице фарфоровыми шарами. Для выделения различных классов крупности навеску измельченного пирита и сфалерита рассеивали на наборе сит до получения материала крупностью – 0,074 + 0,044 мм.

Методика проведения флотационных опытов

Пенную флотацию вели в лабораторной флотационной машине ФЛ-189 с объемом камеры 100 см³.

Навеску сфалерита и пирита указанного класса крупности (5 г) загружали в камеру флотационной машины, в которой её перемешивали с водой заданного pH = 8, 10, 12 (известь) 10 мин. Затем добавляли один из сульфатов железа (II), меди (II) или цинка и перемешивали 5 мин, собиратель (бутиловый ксантогенат калия и дитиофосфат натрия) перемешивали 3 мин, и в конце добавляли пенообразователь (метилизобутилкарбинол (МИБК)), после чего перемешивали 1 мин. Флотацию проводили с порционным съемом пенного продукта. Общее время флотации составило 5 мин.

Обсуждение результатов

На рис. 2, 3 и 4 изображены зависимости извлечения пирита и сфалерита от расходов указанных сульфатов металлов при pH минеральной суспензии 8, 10 и 12 при флотации минерала бутиловым ксантогенатом калия. Расход собирателей составлял 100 г/т.

Как следует из рис. 2, а, при введении медного купороса во флотационную пульпу при флотации пирита бутиловым ксантогенатом калия наблюдается активация

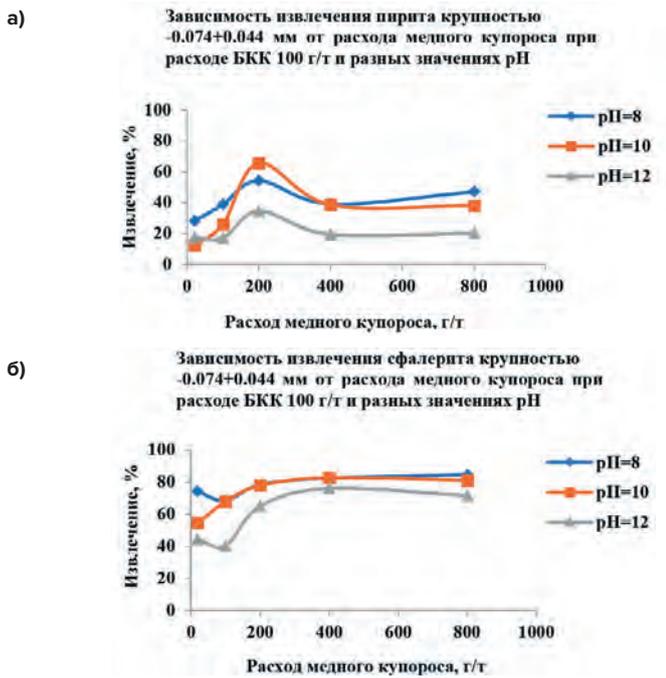


Рис. 2 Извлечение пирита (а) и сфалерита (б) при флотации бутиловым ксантогенатом калия в зависимости от расхода медного купороса при разных значениях pH

Fig. 2 Recovery of pyrite (a) and sphalerite (б) by flotation with butyl potassium xanthogenate depending on the copper sulfate consumption at different pH values

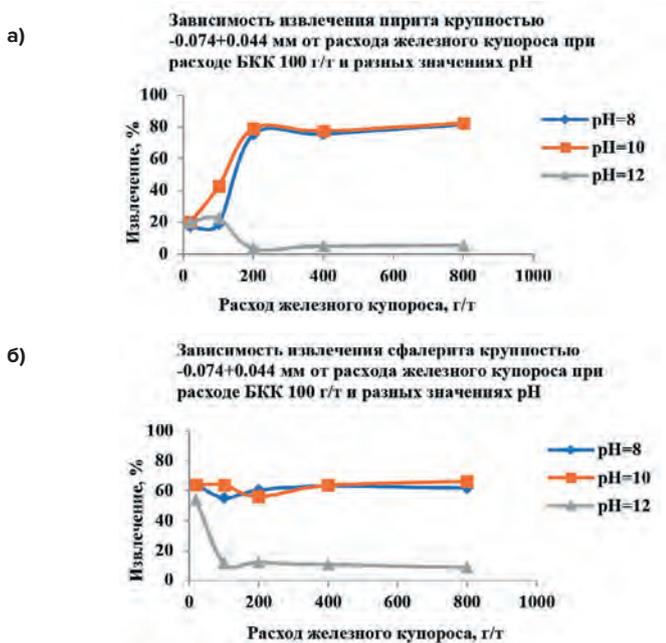


Рис. 3 Извлечение пирита (а) и сфалерита (б) при флотации бутиловым ксантогенатом калия в зависимости от расхода железного купороса при разных значениях pH

Fig. 3 Recovery of pyrite (а) and sphalerite (б) by flotation with butyl potassium xanthogenate depending on the iron sulfate consumption at different pH values

флотации пирита при всех исследуемых значениях pH. При этом максимальная активация флотации наблюдается при расходе медного купороса 200 г/т. Так, при pH = 10 прирост извлечения пирита в пенный продукт составил 65%. Как следует из рис. 2, б, с повышением расхода суль-

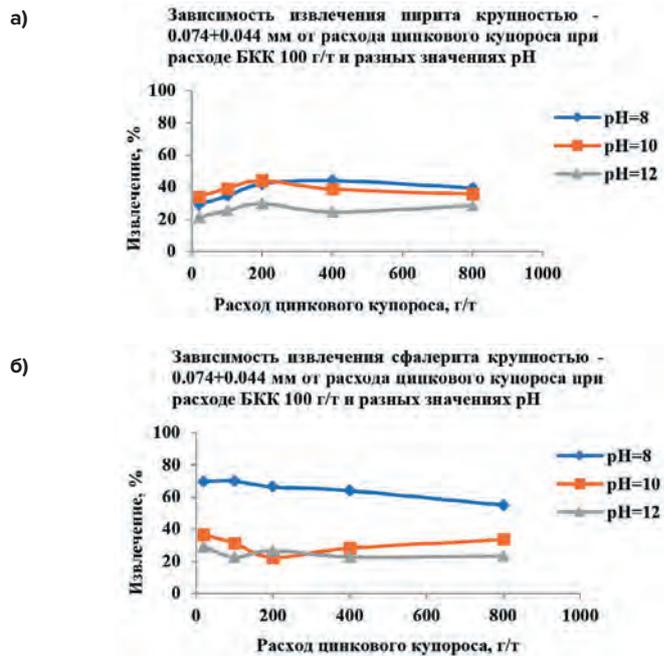


Рис. 4 Извлечение пирита (а) и сфалерита (б) при флотации бутиловым ксантогенатом калия в зависимости от расхода цинкового купороса при разных значениях pH

Fig. 4 Recovery of pyrite (а) and sphalerite (б) by flotation with butyl potassium xanthogenate depending on the zinc sulfate consumption at different pH values

фата при флотации сфалерита бутиловым ксантогенатом калия наблюдалась активация его флотации при всех исследуемых значениях pH.

Железный купорос оказывает сильное активирующее воздействие на флотацию пирита при использовании в качестве собирателя бутилового ксантогената калия при pH 8 и 10 (рис. 3, а и 3, б). При pH 12 железный купорос депрессирует флотацию пирита. При флотации сфалерита с ксантогенатом малые расходы реагента сильно активируют – сфалерит с 2 до 54%. Дальнейший рост расхода сульфата железа (II) с 20 г/т до 800 г/т устойчиво депрессирует флотацию сфалерита до уровня 12%.

consumption at different pH values
Анализ результатов исследования (см. рис. 4) продемонстрировал, что введение цинкового купороса во флотационную пульпу активирует флотационные процессы при исследуемых значениях pH = 8 и 10. Увеличение расхода цинкового купороса до 400 г/т снижает выход ценного компонента. При pH = 10 прирост извлечения пирита в пенный продукт составил 38%. При pH = 12 (см. рис. 4, б) наблюдается не депрессирующее, а активирующее действие сульфата цинка, наиболее проявляющееся при использовании бутилового ксантогената калия в качестве собирателя.

Выводы

При проведении настоящего исследования установлено, что:

- медный, цинковый и железный купорос на флотацию руд сложного вещественного состава оказывает разнонаправленное действие;
- pH-фактор жидкой фазы влияет на флотируемость руд сложного вещественного состава;

- увеличение расхода купоросов (меди, цинка и железа) на флотацию руд сложного вещественного состава при использовании в качестве собирателя бутилового ксантогената снижает флотуемость руд сложного вещественного состава при pH-факторе жидкой фазы 12;
- наиболее контрастно действие исследованных купоросов меди, цинка и железа проявляется при флотации сфалерита при pH =10, когда наблюдается активация флотации сфалерита медным, а депрессия – цинковым и железным купоросами.

Список литературы / References

1. Каунг П.А., Семикин А.А., Хайрутдинов А.М., Дехтяренко А.А. Вовлечение техногенных отходов в переработку – парадигма ресурсного обеспечения устойчивого развития. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(2):385–397. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-385-397>
Kaung P.A., Semikin A.A., Khayrutdinov A.M., Dekhtyarenko A.A. Recycling of industrial waste is a paradigm of resource provision for sustainable development. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):385–397. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-385-397>
2. Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Петров Д.Н. Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(2):349–364. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364>
Kovalski E.R., Kongar-Syuryun C.B., Petrov D.N. Challenges and prospects for several-stage stoping in potash mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):349–364. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364>
3. Khoreshok A., Kantovich L., Kuznetsov V., Preis E., Kuziev D. The results of cutting disks testing for rock destruction. *E3S Web Of Conferences*. 2017;15:03004. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20171503004>
4. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов для безвзрывной послойной выемки прочных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(2):123–128. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-123-128>
Klement'eva, I.N., Kuziev, D.A. Actual status and prospects for future development of surface miners, designed for for blastless lit-by-lit excavation of solid rock. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;2019(2):123–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-123-128>
5. Павленко М.В., Барнов Н.Г., Кузиев Д.А., Кенжабаев К.Н., Монзоев М.В. Вибрационное воздействие через скважины и технология дегазационной подготовки низкопроницаемого угольного пласта. *Уголь*. 2020;(1):3–40. <https://doi.org/10.18796/041-5790-2020-1-3-40>
Pavlenko M.V., Barnov N.G., Kuziev D.A., Kenzhabaev K.N., Monzoev M.V. Vibration impact through wells and the technology of degassing of the preparation of low-permeability coal seam. *Ugol'*. 2020;(1):3–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/041-5790-2020-1-3-40>
6. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённо-деформированное состояние массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2023;13(4):177–187. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>
Kongar-Syuryun C.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*. 2023;13(4):177–187. (In Russ.) <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>
7. Хайрутдинов М.М., Каунг П.А., Чжо З.Я., Тюляева Ю.С. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсозобновляемых технологий. *Безопасность труда в промышленности*. 2022;5:57–62. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-5-57-62>
Khayrutdinov M.M., Kaung P.A., Chzho Z.Ya., Tyulyaeva Y.S. Ensuring Environmental Safety in the Implementation of the Resource-renewable Technologies. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2022;2022(5):57–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-5-57-62>
8. Лиготский Д.Н., Аргимбаева К.В. Технология посекционного формирования техногенного месторождения с последующей отработкой гидравлическим экскаватором «обратная лопата». *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(1):111–121. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-111-121>
Ligotsky D.N., Argimbaeva K.V. The sectional formation technology of an anthropogenic deposit with its subsequent mining using a hydraulic pull shovel. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(1):111–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-111-121>
9. Gugunskiy D., Chernykh I., Khairutdinov A. Legal Models for Activities on the Exploration and Utilization of Space Resources: Towards the “Space-2030” Agenda. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1100 AISC:657–664. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39319-9_73
10. Куренков Д.С., Федоров Г.Б., Дудченко О.Л. Физические основы применения акустических колебаний для интенсификации растворения каменной соли. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5):45–53. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_45
Kurenkov D.S., Fedorov G.B., Dudchenko O.L. Physics of application of acoustic vibrations in stimulation of dissolution of rock salt. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5):45–53. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_5_0_45
11. Mikolas M., Mikusinec J., Abrahamovsky J., Dibdiakova, J., Tyulyaeva Y., Srek J. Activities of a Mine Surveyor and a Geologist at Design Bases in a Limestone Quarry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;906(1):012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012073>
12. Ишейский В.А., Рядинский Д.Э., Магомедов Г.С. Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываеваемого массива. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):79–95. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_79
Isheisky V.A., Ryadinskii D.E., Magomedov G.S. Increasing the quality of fragmentation of blasting rock mass based on accounting for structural features of massif in the blast design. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9):79–95. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_79
13. Vacova D., Khairutdinov A.M., Gago F. Cosmic Geodesy Contribution to Geodynamics Monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;906(1):012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012074>

14. Голик В.И., Гашимова З.А., Лискова М.Ю., Конгар-Сюрюн Ч.Б. К проблеме минимизации объемов мобильной пыли при разработке карьеров. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;(11):28-33. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-11-28-33>
Golik V.I., Gashimova Z.A., Liskova M.Yu., Kongar-Syuryun C.B. To the problem of minimizing the volume of mobile dust in the development of pits. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*. 2021;2021(11):28-33. (In Russ) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-11-28-33>
15. Yamilev M.Z., Masagutov A.M., Nikolaev A.K., Pshenin V.V., Zaripova N.A., Plotnikova K.I. Modified equations for hydraulic calculation of thermally insulated oil pipelines for the case of a power-law fluid. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2021;11(4):388-395. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2021-11-4-388-395>
16. Репин С.В., Афанасьев А.С., Добромиров В.Н., Барсуков В.О. Инновационный способ утилизации отходов монолитных строительных конструкций. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(3):771-783. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-771-783>
Repin S.V., Afanasyev A.S., Dobromirov V.N., Barsukov V.O. Innovative method for disposal of waste of monolithic building structures. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(3):771-783. (In Russ) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-771-783>
17. Korshak A.A., Vykhodtseva N.A., Gaysin M.T., Korshak A.A., Pshenin V.V. Influence of operating factors on the performance of oil vapor recovery adsorption plants. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2019;9(5):550-557. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2019-9-5-550-557>
18. Golik V.I., Mitsik M.F., Aleksakhina Y.V., Alenina E.E., Ruban-Lazareva N.V., Kruzhkova G.V., Kondratyeva O.A., Trushina E.V., Skryabin O.O., Khayrutdinov M.M. Comprehensive Recovery of Metals in Tailings Utilization with Mechanochemical Activation. *Resources*. 2023;12(10):113. <https://doi.org/10.3390/resources12100113>
19. Korshak A.A., Nikolaeva A.V., Nagatkina A.S., Gaysin M.T., Korshak A.A., Pshenin V.V. Method for predicting the degree of hydrocarbon vapor recovery at absorption. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2020;10(2):202-209. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2020-10-2-202-209>
20. Korshak A.A., Pshenin V.V. Determination of parameters of non-pump ejector gasoline vapor recovery unit. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2023;13(1):25-31. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2023-13-1-25-31>
21. Дидманидзе О.Н., Афанасьев А.С., Хакимов Р.Т. Математическая модель фазового перехода сжиженного метана в криогенном баке транспортного средства. *Записки Горного института*. 2020;243(3):337-347. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.337>
Didmanidze O.N., Afanasev A.S., Khakimov R.T. Mathematical model of the liquefied methane phase transition in the cryogenic tank of a vehicle. *Journal of Mining Institute*. 2020;243(3):337-347. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.337>
22. Задков Д.А., Габов В.В., Бабурь Н.В., Стебнев А.В., Теремецкая В.А. Энергоэффективная секция механизированной крепи очистного комплекса, адаптивная к условиям эксплуатации. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6):46-61. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_46
Zadkov D.A., Gabov V.V., Babur N.V., Stebnev A.V., Teremetskaya V.A. Adaptable and energy-efficient powered roof support unit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;2022(6):46-61. (In Russ) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_6_0_46

Информация об авторах

Чжо Зай Я – кандидат технических наук, Лаборатория обогащения полезных ископаемых, Научно-технический исследовательский центр Пин У Львин, Мандалай, Мьянма; кафедра обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kokyawgyi49@gmail.com

Семикин Андрей Андреевич – аспирант кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: 7emikin@mail.ru

Сандакова Дарима Галсановна – аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: dsandakova@inbox.ru

Дехтяренко Андрей Андреевич – аспирант кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: 1566@7274069.ru

Якимов Виктор Андреевич – студент, Дмитровский институт непрерывного образования, Государственный университет «Дубна», Московская область, г. Дмитров, Российская Федерация; e-mail: viktor_vtyakov@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 05.04.2024

Поступила после рецензирования: 13.05.2024

Принята к публикации: 19.05.2024

Information about the authors

Kyaw Zay Ya – Cand. Sci. (Eng.), Mineral Enrichment Laboratory, Science and Technological Research Center Pyin Oo Lwin, Mandalay, Myanmar; Department of Enrichment and Processing of Mineral Resources and Technogenic Raw Materials; College of Mining, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Andrey A. Semikin – Postgraduate Student, Department of Enrichment and Processing of Mineral Resources and Technogenic Raw Materials, College of Mining, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: 7emikin@mail.ru

Darima G. Sandakova – Postgraduate Student, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: dsandakova@inbox.ru

Andrei A. Dekhtyarenko – Postgraduate Student, Department of Mining Equipment, Transport and Mechanical Engineering, College of Mining, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; e-mail: 1566@7274069.ru

Victor A. Yakimov – Student, Dmitrov Institute of Continuing Education, State University “Dubna”, Moscow region, Dmitrov, Russian Federation; e-mail: viktor_vtyakov@mail.ru

Article info

Received: 05.04.2024

Revised: 13.05.2024

Accepted: 19.05.2024