

Исследование физико-механических свойств сгущенных хвостов обогащения и формируемого искусственного массива в выработанном пространстве карьера

В.Н. Калмыков¹, А.А. Гоготин², В.Ш. Галямов², А.С. Тарабаев¹✉

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация

² ООО «УралГеоПроект», г. Магнитогорск, Российская Федерация

✉ ferrum1992@mail.ru

Резюме: В статье представлены результаты исследования физико-механических свойств сгущенных хвостов обогащения, а также закономерностей их изменения в процессе размещения в выработанном пространстве карьера. Необходимость проведения экспериментальных работ вызвана имеющими место несоответствием параметров, создаваемых намывом искусственных массивов, по сравнению с проектными решениями, в частности, углов растекания, отсутствием формируемой прудковой зоны в теле массива, а также незначительным влиянием на притоки водоотливной установки. В качестве объектов исследований приняты такие характеристики сгущенных хвостов обогащения, которые на стадии проектирования определяют параметры технологии намыва и формируемого в карьере искусственного массива: плотность, минеральная плотность, абсолютная и относительная влажность, свободная водоотдача, вязкость, напряжение сдвига, угол растекания, коэффициент фильтрации. Испытание данных характеристик производилось с использованием стандартных методик. Отбор представительных проб произведен в местах сброса сгущенных хвостов в емкость карьера и непосредственно в разгрузке комплекса пастового сгущения со сгустителя №2. Установлено, что по мере транспортирования сгущенных хвостов обогащения к месту укладки в карьере изменения плотностных, влажностных, фильтрационных параметров сгущенного продукта не происходит, а реологические свойства, такие как вязкость, напряжение сдвига, угол растекания, претерпевают существенное изменение, которое должно учитываться в проектных решениях. Ознакомление с технологией сгущения, транспортирования и складирования пастовых смесей в карьерных выработках позволяет считать в качестве основной причины изменения структуры и свойств сгущенных хвостов обогащения – механическое воздействие на флокулы пульпы и их деструкцию, заключающуюся в разрыве макромолекул.

Ключевые слова: хвосты обогащения, сгущенный продукт, карьер, выработанное пространство, угол растекания, формируемый искусственный массив

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-21-10040, <https://rscf.ru/project/23-21-10040>.

Для цитирования: Калмыков В.Н., Гоготин А.А., Галямов В.Ш., Тарабаев А.С. Исследование физико-механических свойств сгущенных хвостов обогащения и формируемого искусственного массива в выработанном пространстве карьера. *Горная промышленность*. 2024;(2):111–115. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-111-115>

Studies of physical and mechanical properties of thickened concentration tailings and artificial rock masses resulting from their disposal in mined-out spaces of open-pits

V.N. Kalmykov¹, A.A. Gogotin², V.S. Galyamov², A.S. Tarabaev¹✉

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

² LLC UralGeoProekt, Magnitogorsk, Russian Federation

✉ ferrum1992@mail.ru

Abstract: The article presents the results of studying physical and mechanical properties of thickened concentration tailings, as well as regularities in their changes during the dumping process in mined-out spaces of open-pits. The necessity of experimental studies is explained by the existing discrepancy between the parameters of the artificial hydraulic deposition of soils and the design solutions, in particular, the spreading angles, the lack of a ponding zone created within the rock mass body, as well as the insignificant influence on the intakes of the dewatering plant. The following characteristics of the thickened tailings that define the parameters of the hydraulic deposition technology and the artificial massif formed inside the pit at the design stage were taken as the research objects: density, mineral density, absolute and relative moisture content, storativity, viscosity, shear stress, flowing angle, and water conductivity. These characteristics were tested using conventional methods. Representative

samples were collected at the discharge points of the thickened tailings in the open pit and directly at the discharge point of the thickener No.2 at the paste thickening plant. It was established that as the thickened tailings are transported to the place of their deposition inside the open pit, no changes take place in their density, moisture content, and water conductivity, but the rheological properties, such as viscosity, shear stress, angle of spreading undergo a significant change, which should be taken into account in design solutions. Being familiar with the technology of thickening, transportation and storage of paste mixtures in open-pit mines allows us to consider the mechanical impact on the pulp flocculi and their destruction, consisting in the rupture of the macromolecules, as the main cause of changes in the structure and properties of the thickened tailings.

Keywords: concentration tailings, thickened product, open-pit mine, mined-out space, spreading angle, generated artificial rock mass

Acknowledgements: The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No.23-21-10040, <https://rscf.ru/project/23-21-10040>.

For citation: Kalmykov V.N., Gogotin A.A., Galyamov V.S., Tarabaev A.S. Studies of physical and mechanical properties of thickened concentration tailings and artificial rock masses resulting from their disposal in mined-out spaces of open-pits. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):111–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-111-115>

Введение

Ежегодно в Уральском регионе формируются огромные по занимаемой площади и высоте хвостохранилища и отвалы, размещаемые на земной поверхности. Одновременно с этим усложняются горно-геологические условия разработки месторождений, снижается среднее содержание полезных компонентов [1].

Вопрос размещения отходов обогащения руд особенно актуален для медно-колчеданных месторождений Урала, так как емкости существующих хвостохранилищ обогатительных фабрик исчерпаны, а выделение земель под новые хвостохранилища затруднено, назрела острая необходимость изыскания емкостей для размещения отходов обогащения, в качестве которых могут быть использованы пространства отработанных карьеров [2].

В настоящее время в уральском регионе отработанное карьерное пространство активно используется для размещения отходов обогащения при отработке медноколчеданных месторождений – Учалинского, Гайского, Александринского ГОКов, рассматривается применение данной технологии и на месторождениях других регионов, в частности, на месторождении «Медвежий ручей» (г. Норильск) [1–4].

Целью проведенной работы является выявление причин изменения параметров формируемого искусственного массива при размещении сгущенного продукта в емкости карьера, а также динамики реологических свойств пастового продукта – вязкости, напряжения сдвига, угла растекания в процессе транспортирования и укладки.

Данная работа проводилась на пробах сгущенных хвостов обогащения, предоставленных Учалинским ГОКом. Подача сгущенных хвостов в Учалинский карьер осуществляется по двум трубопроводам с южной части карьера, откуда паста самотеком стекает по уступам карьера и достигает дна [5]. Согласно проектным решениям угол растекания пульпы составляет 12°, однако в процессе проведения маркшейдерской съемки установлено, что фактический угол растекания отличается от проектного. Кроме того, не наблюдается образования пружковой зоны [6], а в постоянно действующей системе водоотлива, включающей водоотливную установку и фильтрационные устройства, не фиксируется снижение водопритока [7].

Отбор представительных проб произведен в местах сброса сгущенных хвостов в емкость карьера и непосредственно в разгрузке комплекса пастового сгущения со сгустителя №2 [8–11]. В связи с отсутствием доступа в карьер отбор проб из формируемого искусственного массива в настоящее время невозможен [12–16].

Методика и результаты исследований

Плотность хвостов определялась методом режущего кольца – ГОСТ 5180–2015¹, в результате чего получены значения плотности, приведенные в диаграмме (рис. 1).

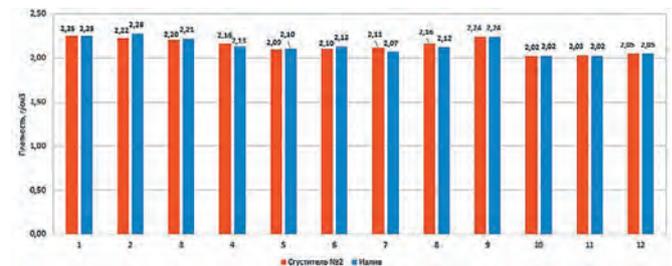


Рис. 1
Диаграмма плотности хвостов

Fig. 1
Density chart of thickened tailings

Из рис. 1 видно, что минимальное значение плотности составляет 2,02 г/см³, максимальное – 2,28 г/см³, среднее значение – 2,14 г/см³.

Определение минеральной плотности хвостов проводилось в соответствии с ГОСТ 8269.0–97², полученные данные представлены в виде диаграммы (рис. 2).

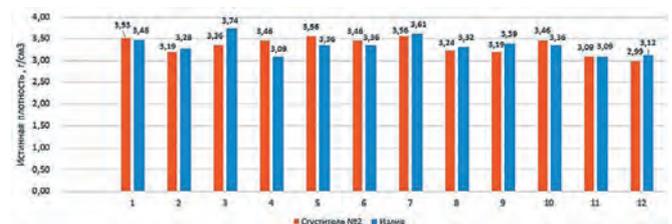


Рис. 2
Диаграмма минеральной плотности хвостов

Fig. 2
Mineral density chart of thickened tailings

Из рис. 2 видно, что минимальное значение минеральной плотности составляет 2,99 г/см³, максимальное – 3,74 г/см³, среднее значение – 3,35 г/см³.

Влажность хвостов определялась методом высушивания до постоянной массы на трёх образцах от каждой пробы,

1 ГОСТ 5180–2015 Грунты. Методы определения физических характеристик. М.: Изд-во стандартов; 2016. 10 с.

2 ГОСТ 8269.0–97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. М.: Изд-во стандартов; 2018. 51 с.

ГОСТ 5180–2015³. Результаты исследований абсолютной и относительной влажности хвостов представлены на рис. 3, 4.

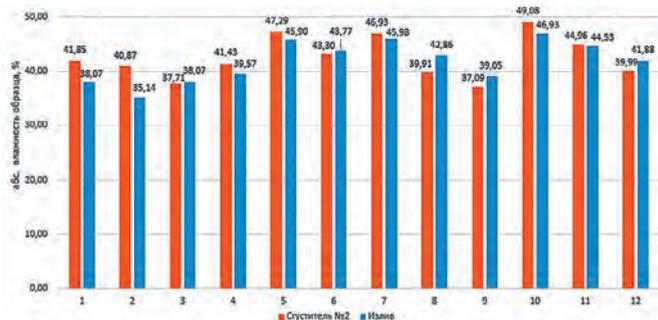


Рис. 3
Диаграмма абсолютной влажности

Fig. 3
Absolute moisture content chart

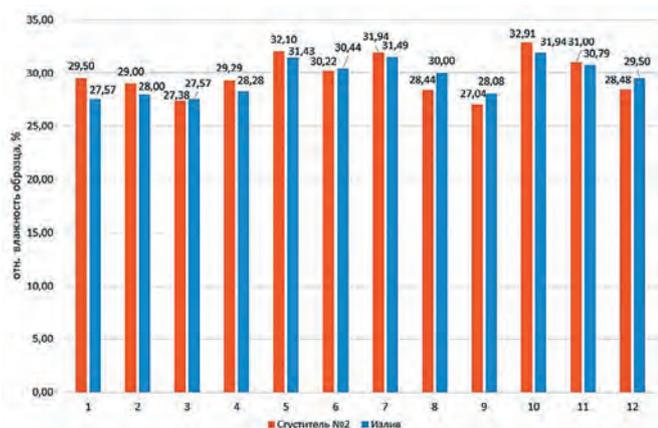


Рис. 4
Диаграмма относительной влажности

Fig. 4
Relative moisture content chart

Исследования свободной водоотдачи проводились путем отстаивания хвостов в мерном цилиндре в течение нескольких суток, далее производился замер осветленной воды и вычислялся объем водоотдачи (рис. 5).



Рис. 5
Диаграмма свободной водоотдачи хвостов

Fig. 5
Storativity chart of thickened tailings

Из рис. 5 следует, что свободная водоотдача материала изменяется от 6,17 до 11,24%.

³ ГОСТ 5180–2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Изд-во стандартов; 2016. 20 с.

Также посредством прибора ПКФ-01 «Союздорнии» определен коэффициент фильтрации хвостов, который составил в среднем 0,017 м/сут в месте разлива, в разгрузке сгустителя №2 – 0,014 м/сут. Все полученные значения в соответствии с ГОСТ 25100–2020⁴ по классификации водопроницаемости относятся к категории «слабоводонепроницаемые».

Из анализа полученных значений плотности, минеральной плотности, абсолютной и относительной влажностей, свободной водоотдачи, коэффициента фильтрации следует, что по мере транспортирования сгущенных хвостов обогащения к месту укладки в карьере изменений вышеуказанных параметров хвостов не происходит. Имеющиеся различия показателей находятся в пределах точности замеров и не имеют систематического характера.

Испытания реологических свойств сгущенного материала включали определение вязкости, напряжения сдвига, угла растекания и их динамики в процессе размещения в карьере.

Кинетика изменения вязкости материала определена при помощи вискозиметра Fungilab, напряжение сдвига определено на реометре YR-1 фирмы Brookfield (результаты представлены на рис. 6 и 7)⁵.

В процессе проведения исследований сгущенных хвостов получены следующие средние значения вязкости

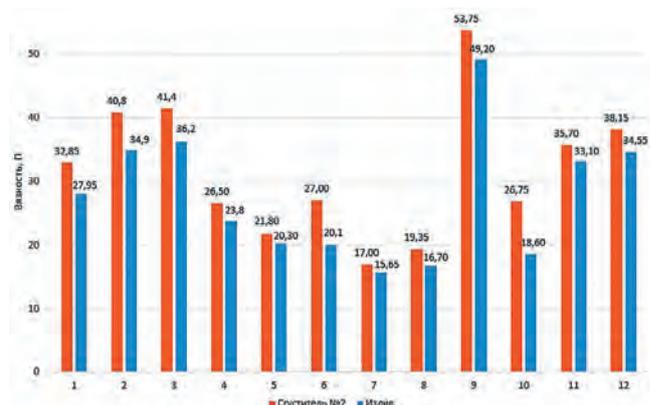


Рис. 6
Диаграмма вязкости исследуемых хвостов

Fig. 6
Viscosity chart of thickened tailings

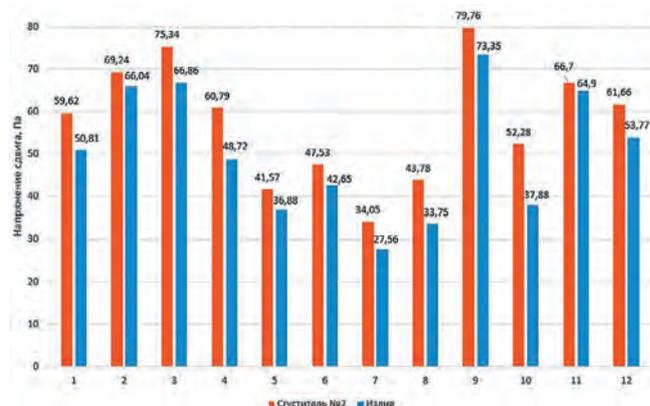


Рис. 7
Диаграмма напряжений сдвига исследуемых хвостов

Fig. 7
Shear stress chart of thickened tailings

⁴ ГОСТ 25100–2020 Грунты. Классификация. М.: Изд-во стандартов; 2020. 38 с.

⁵ ГОСТ 5180–2015 Грунты. Методы определения физических характеристик. М.: Изд-во стандартов; 2016. 10 с.; ГОСТ 8269.0–97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. М.: Изд-во стандартов; 2018. 51 с.

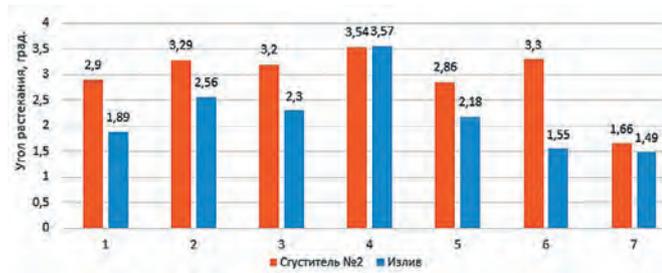


Рис. 8
 Диаграмма угла растекания

Fig. 8
 Spreading angle chart
 of thickened tailings

для проб, отобранных с излива, они составляют 27,59 П, отобранных с разгрузки сгустителя №2 – 31,75 П. Среднее значение напряжения сдвига для излива составляет 50,26 Па, с разгрузки сгустителя №2 – 57,69 Па. Во всех пробах фиксируется понижение вязкости и напряжения сдвига в процессе транспортирования сгущенных хвостов.

При помощи вискозиметра Суттарда определена растекаемость пульпы, значения которой отражены в диаграмме на рис. 8. Во всех пробах имеет место снижение угла растекания.

Средний угол растекания по результатам замеров на вискозиметре Суттарда показал следующие значения: для точки отбора проб с разгрузки сгустителя №2 составляет 2,96°, для места сброса в карьер – 2,22°. Анализ проведенных исследований показал, что полученные углы растекания значительно отличаются от проектных значений по причине механического воздействия на стадии перекачивания продукта и в процессе сброса материала с большой высоты, а также изменения состава перерабатываемых руд и тонины помола.

Изменение реологических параметров сгущенных хвостов в зависимости от места отбора проб объясняется разрушением молекул полимера в результате приложенных

механических нагрузок и появляющейся деформации в процессе транспортирования по трубопроводам, называемым механической деструкцией полимера. При механической деструкции происходит изменение структуры и свойств сгущенных хвостов, связанное с разрывом макромолекул.

С целью подтверждения данного предположения было проведено исследование, в ходе которого определялись реологические свойства сгущенных хвостов в исходном состоянии и после механического воздействия, позволяющего имитировать разрушение флокул, путем обработки исследуемого материала при высоких оборотах миксера. Анализ значений реологических свойств материала после механического воздействия показал, что имеют место изменения: на 15,3% зафиксировано понижение угла растекания (среднее значение с разгрузки сгустителя №2 уменьшилось до 2,5°, в месте сброса в карьер – до 1,88°), на 25,5% понижение вязкости (среднее значение с разгрузки сгустителя №2 составляет 23,65 П, для места сброса в карьер – 20,55 П), понижение напряжения сдвига – в среднем на 14,0% (среднее значение с разгрузки сгустителя №2 составляет 49,61 Па, для места сброса в карьер – 43,22 Па), что хорошо согласуется с данными, приведенными выше.

Заключение

Исследования показали, что в период приготовления, транспортирования и укладки сгущенного продукта происходят существенные изменения реологических характеристик сгущенных хвостов вследствие их механической деструкции.

Изменение свойств сгущенного продукта в процессе транспортирования и укладки необходимо учитывать в проектных решениях по определению угла растекания, мест точек сброса пульпы в карьер, конструкции, состава и производительности фильтрационных систем и водоотлива.

Список литературы / References

1. Зотеев О.В., Калмыков В.Н., Гоготин А.А., Зубков А.А., Зубков А.А. Исследование физико-механических свойств отходов обогащения для разработки технологии формирования закладочного массива в выработанном пространстве карьера «Учалинский». *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2013;(4):13–17.
 Zoteev O.V., Kalmykov V.N., Gogotin A.A., Zubkov A.A., Zubkov A.A. The investigation of tailings physical and mechanical properties for the development of the method of filling solid mass forming in Uchalinsky quarry waste area. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2013;(4):13–17. (In Russ.)
2. Куликова А.А., Ковалева А.М. Применение хвостов обогащения в качестве закладки выработанного пространства рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):144–154. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-144-154>
 Kulikova A.A., Kovaleva A.M. Use of tailings of enrichment for laying of the developed space of mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):144–154. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-144-154>
3. Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А., Копылов А.Б., Головин К.А. Техногенные отходы в закладочных смесях – путь снижения воздействия на экологию. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2022;(1):152–164.
 Khayrutdinov M.M., Kuziev D.A., Kopylov A.B., Golovin K.A. Man-made waste in backfill mixtures – a way to reduce environmental impact. *Izvestiya Tluskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(1):152–164. (In Russ.)
4. Александров В.И., Ватлина А.М., Махараткин П.Н. Обоснование и выбор расчетных параметров гидрофицированного комплекса оборудования для получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения. *Записки Горного института*. 2023;262:541–551. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.68>
 Alexandrov V.I., Vatlina A.M., Makharatkin P.N. Substantiation and selection of the design parameters of the hydroficated equipment complex for obtaining backfill mixtures from current enrichment tailings. *Journal of Mining Institute*. 2023;262:541–551. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.68>
5. Калмыков В.Н., Гоготин А.А., Тарабаев А.С. Опыт размещения сгущенных хвостов обогащения в Учалинском карьере в условиях совмещения с подземными работами. *Актуальные проблемы горного дела*. 2021;(2):30–34.
 Kalmykov V.N., Gogotin A.A., Tarabaev A.S. The experience of placing condensed tailings of enrichment in the Uchalinsky quarry in combination with underground work. *Aktualnye Problemy Gornogo Dela*. 2021;(2):30–34. (In Russ.)

6. Зотеев О.В., Калмыков В.Н., Гоготин А.А., Зубков А.Е., Ахмедьянов И.Х., Зубков А.А., Бондаренко Д.А. Разработка технологии закладки Учалинского карьера сгущенными отходами обогащительного производства. В кн.: *Комплексное освоение месторождений полезных ископаемых: сб. науч. тр.* Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова; 2013. С. 44–47.
Zoteev O.V., Kalmykov V.N., Gogotin A.A., Zubkov A.E., Akhmedyanov I.H., Zubkov A.A., Bondarenko D.A. Development of the backfilling technology using thickened concentration wastes at the Uchalinskiy open pit mine. In: *Integrated development of mineral deposits: collection of scientific articles.* Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2013, pp. 44-47. (In Russ.).
7. Зубков А.А. *Обоснование параметров технологии формирования техногенных массивов из отходов обогащения в выработанном карьерном пространстве при открыто-подземной разработке медно-колчеданных месторождений: дис. ... канд. техн. наук.* Магнитогорск; 2013. 160 с.
Zubkov A.A. *Justification of technological parameters for creation of man-made masses using concentration wastes in combined method of mining copper and cobalt deposits: Cand. eng. sci. diss.,* Magnitogorsk; 2013, 160 p. (In Russ.).
8. Gao J., Fourie A. Studies on thickened tailings deposition in flume tests using the computational fluid dynamics (CFD) method. *Canadian Geotechnical Journal.* 2019;56(2):249–262. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0228>
9. Blight G.E., Melentev A.V. The master profile for hydraulic fill tailings beaches. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering.* 1994;107(1):27–40. <https://doi.org/10.1680/igeng.1994.25718>
10. Jiao H., Yang W., Ruan Z., Yu J., Liu J., Yang Y. Microscale mechanism of tailing thickening in metal mines. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials.* 2023;30(8):1538–1547. <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2587-0>
11. Cacciuto Vargas C., Marinovic Pulido A. Sustainable management of thickened tailings in Chile and Peru: A review of practical experience and socio-environmental acceptance. *Sustainability.* 2022;14(17):10901. <https://doi.org/10.3390/su141710901>
12. Бармин И.С., Морозов В.В., Поливанская В.В. Исследование и разработка режимов сгущения и флотации шламовых классов лежалых хвостов. *Руды и металлы.* 2020;(1):87–93. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2020-10007>
Barmin I.S., Morozov V.V., Polivanskaya V.V. Research and development of regimes of thickening and flotation of sludge classes of stale tails. *Ores and Metals.* 2020;(1):87–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2020-10007>
13. Шершнева А.А., Кисляков В.Е. Растекание пастообразных хвостов обогащительного передела. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.* 2014;7(3):290–294.
Shershnev A.A., Kislykov V.E. Spreadability of paste tailings after concentrating repartition. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies.* 2014;7(3):290–294. (In Russ.)
14. Зотеев В.Т., Зотеев О.В., Костерова Т.К., Тагильцев С.Н., Осламенко В.В. Гидрогеологические и геомеханические условия формирования хвостохранилища в Главном карьере Высокогорского ГОКа. *Известия вузов. Горный журнал.* 1995;(5):111–121.
Zoteev V.T., Zoteev O.V., Kosterova T.K., Tagiltsev S.N., Oslamenko V.V. Hydrogeological and geomechanical conditions of tailings storage formation in the Main quarry of the Vysokogorsky GOK. *Izvestiya Vuzov. Gornyi Zhurnal.* 1995;(5):111–121.
15. A Chryst, Fourie A., Monch A., Nairn D., Seddon K.D. Towards an integrated approach to tailings management. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.* 2012;112(11):965–969. https://doi.org/10.36487/ACG_REP/1263_01_CHRYSS
16. Николаев А.К., Авксентьев С.Ю., Ляшик С.П. Исследование реологических характеристик пастообразных гидросмесей. *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2008;(10):352–355.
Nikolaev A.K., Avksentiev S.Yu., Lyashik S.P. Investigation of rheological characteristics of pasty hydraulic mixtures. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2008;(10):352–355.

Информация об авторах

Калмыков Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация; e-mail: kalmiakov34@gmail.com

Гоготин Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, директор ООО «УралГеоПроект», г. Магнитогорск, Российская Федерация; e-mail: gogotin80@mail.ru

Галямов Виктор Шамильевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией ООО «УралГеоПроект», г. Магнитогорск, Российская Федерация; e-mail: victorgalyamov@yandex.ru

Тарабаев Андрей Сергеевич – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация; e-mail: ferrum1992@mail.ru

Information about the authors

Vyacheslav N. Kalmykov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; e-mail: kalmiakov34@gmail.com

Alexey A. Gogotin – Cand. Sci. (Eng.), Director, LLC UralGeo-Proekt, Magnitogorsk, Russian Federation; e-mail: gogotin80@mail.ru

Viktor S. Galyamov – Cand. Sci. (Eng.), Head of the laboratory, LLC UralGeoProekt, Magnitogorsk, Russian Federation; e-mail: victorgalyamov@yandex.ru

Andrey S. Tarabaev – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation; e-mail: ferrum1992@mail.ru

Article info

Received: 03.02.2024

Revised: 04.03.2024

Accepted: 11.03.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.02.2024

Поступила после рецензирования: 04.03.2024

Принята к публикации: 11.03.2024