ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(4):125-139
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 691.54 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_125

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВОДООТДЕЛЕНИЯ ПРИ ЗАКЛАДОЧНЫХ РАБОТАХ

М.А. Васильева[1], А.А. Волчихина[1], Р.Б. Кускильдин[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: alexandravolchihina@yandex.ru

Аннотация: Горнодобывающие предприятия в процессе добычи и обогащения полезного ископаемого используют большие объемы чистой воды в хозяйственных и технологических процессах. Основным мероприятием по снижению водопотребления на горных предприятиях является переход от «прямоточного» водоснабжения к оборотному, когда вода используется в замкнутом цикле непрерывно. Такое использование воды позволяет также значительно снизить объем промышленных сточных вод. В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению объемов водопотребления на горных предприятиях также за счет увеличения объемов гидрозакладки и закладки твердеющими смесями выработанного пространства. Принимая во внимание явное противоречие требований к содержанию воды, рациональным является применение частичного оборотного водопотребления при закладочных работах. Представлены результаты проведенных исследований по реализации этой задачи на разработанном мобильном закладочном устройстве, предназначенном для закладки выработанного пространства твердеющими смесями с одновременным обезвоживанием закладочной пульпы, отводом отработанной воды и транспортированием сгущенной пульпы в выработанное пространство объемным насосом. Закладочная смесь может подаваться в выработанное пространство через специальные закладочные выработки по специальным вспомогательным выработкам, пройденным с вышележащего горизонта, по трубам, расположенным в выработках отрабатываемого горизонта. Оценка эффективности работы оборудования проводилась на основе анализа распределения массовой доли и скоростей твердых частиц, а также картины распределения скоростей и векторов скоростей воды в выделенной области водоотделителя. Производительность водоотделителя зависит как от его габаритных размеров, характеризующих заполняемость, так и от скоростных режимов подачи и отведения гидросмеси, что в свою очередь оказывает влияние на концентрацию получаемой на выходе гидросмеси. Для оценки влияния на работу узла водоотделителя выполнены исследования при варьировании различных параметров, характеризующих поступающую первичную гидросмесь. Оптимизация режима работы выполнялась по параметру концентрации получаемой гидросмеси. Комплексный анализ полученных результатов с применением модуля Ansys optiSLang позволил провести оценку чувствительности итоговых результатов к входным факторам и определить их весовой коэффициент.

Ключевые слова: горнодобывающие предприятия, водопотребление, закладочные работы, гидросмесь, насосный агрегат, оборотное водоснабжение, гидродинамический профиль, осаждение частиц.

Для цитирования: *Васильева М. А., Волчихина А. А., Кускильдин Р. Б.* Совершенствование механизма водоотделения при закладочных работах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №4. – С. 125–139. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_125.

© М.А. Васильева, А.А. Волчихина, Р.Б. Кускильдин. 2023.

Improvement of water segregation in backfilling

M.A. Vasilyeva[1], A.A. Volchikhina[1], R.B. Kuskildin[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: alexandravolchihina@yandex.ru

Abstract: Mineral mining and processing plants use substantial volumes of pure water for economic and process needs. A general practice in reduction of water consumption at mines is the transition from the once-through water supply to the closed-loop water reuse. It is possible to reduce materially the industrial effluent runoff in this case. At the present time, mines show an increasing trend in water consumption because of hydraulic stowing and cemented paste backfilling. In view of an explicit contradiction in water content standards, it is efficient to use partly recycling water in backfilling. This article describes performance of a new-design mobile plant intended for preparation of cemented paste backfill with its simultaneous dewatering, surplus water export and transportation of thickened pulp to a mined-out void using a positive displacement pulp. Backfill can be fed to mined-out voids via special backfill openings driven from the upper-lying level or in pipes laid in the openings on the current mining level. Evaluation of the equipment performance uses the analysis of patterns of mass fractions and velocities of solid particles, as well as patterns of velocities and velocity vectors of water in certain areas of the water segregator. The capacity of the water segregator depends on its dimensions, and on the velocities of slurry feed and export, which, in its turn, affects the output slurry concentration. The water segregator capacity was estimated at the varied parameters of the input slurry. The mode of operation was optimized by the criterion of the output slurry concentration. The integrated analysis of the obtained results in Ansys optiSLang allowed estimates of sensitivity of the results to the input factors and provided their weights.

Key words: mines, water consumption, backfilling, slurry, pumping unit, recycling water supply, hydrodynamic profile, particle sedimentation.

For citation: Vasilyeva M. A., Volchikhina A. A., Kuskildin R. B. Improvement of water segregation in backfilling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(4):125-139. [In Russ]. DOI: 10. 25018/0236_1493_2023_4_0_125.

Введение

Горнодобывающие предприятия в процессе добычи и обогащения полезного ископаемого используют большие объемы чистой воды в хозяйственных и технологических процессах. На горнорудных предприятиях на 1 т руды в среднем используется от 0,15 до 3 м^3 свежей воды, а при добыче угля — 0,5 м^3 [1]. По виду экономической деятельности «добыча полезных ископаемых» в 2018 г. объем забора воды составил 5 207,96 млн м^3, или 7,6% от общего объема забора воды по Российской Федерации. При этом для чисто производственных нужд на горных предприятиях в 2018 г. было использовано 769,77 млн м^3 [2].

Следует отметить, что работам по снижению водопотребления в технологических процессах горных предприятий уделяется большое внимание [3]. Основным мероприятием по снижению водопотребления на горных предприятиях является переход от «прямоточного» (водоем — предприятие — водоем) водоснабжения к оборотному, когда вода используется в

замкнутом цикле непрерывно [4]. Такое использование воды позволяет также значительно снизить объем промышленных сточных вод.

В государственном докладе «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году» указано, что водопользователи, осуществляющие добычу полезных ископаемых, имеют относительно небольшой объем оборотного и повторно-последовательного водоснабжения [5].

Особенно затратными являются процессы обогащения полезных ископаемых [6—8]. Потребление чистой воды в процессе обогащения на современном этапе решается за счет оборотного водоснабжения, которое позволяет около 90—95% воды использовать повторно [9]. Однако поступление чистой воды является все же необходимым условием осуществления деятельности горнодобывающего предприятия вследствие неизбежных потерь воды при транспортировке ее по замкнутому контуру [10].

Методы и описание

В Российской Федерации ежегодно добывается более 1 млрд т твердых полезных ископаемых, из которых 40% подвергаются дальнейшему обогащению с использованием воды в качестве технологической среды. При этом ее расход составляет 5—10 м^3/т руды, что обуславливает ежегодное потребление не менее 2 млрд м^3 воды. Использование воды при обогащении полезных ископаемых создает проблемы как в экологической сфере из-за ограниченности водных ресурсов и отрицательного воздействия на окружающую среду обводненных отходов обогащения, так и в технико-экономической сфере из-за больших затрат на перекачку технологических вод и суспензий, безопасную утилизацию обводненных отходов и на обезвоживание полученных продуктов обогащения. Изыскание путей снижения расхода воды при складировании хвостов обогащения полезных ископаемых приобретает все большую актуальность [11].

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению объемов водопотребления на горных предприятиях также за счет увеличения объемов гидрозакладки и закладки твердеющими смесями выработанного пространства [12]. Если при гидрозакладке может использоваться очищенная шахтная вода, поступающая из системы водоотлива, то к жидкой фазе твердеющих смесей предъявляются дополнительные требования (таблица) [13—14]. Особым требованием является недопущение присутствия в ней масел и других примесей.

Нарушение этих требований к воде приводит к отрицательному воздействию на свойства закладочной смеси [15—17]. Это обуславливает необходимость применения свежей воды при закладке твердеющими смесями.

По содержанию воды в твердеющей смеси имеются два взаимоисключающих требования:

- содержание воды должно быть невысоким, так как повышенное ее содержание приводит к снижению нормативной прочности твердеющей смеси;

Требования к воде, применяемой в твердеющих закладочных смесях
Requirements for water used in hardening stowing mixtures

Содержание ионов $(SO_4)^{-2}$, мл/л	не более 2700
Содержание ионов Cl^{-1}, мл/л	не более 2500
pH	не менее 4
Общее содержание солей, мл/л	не более 3700

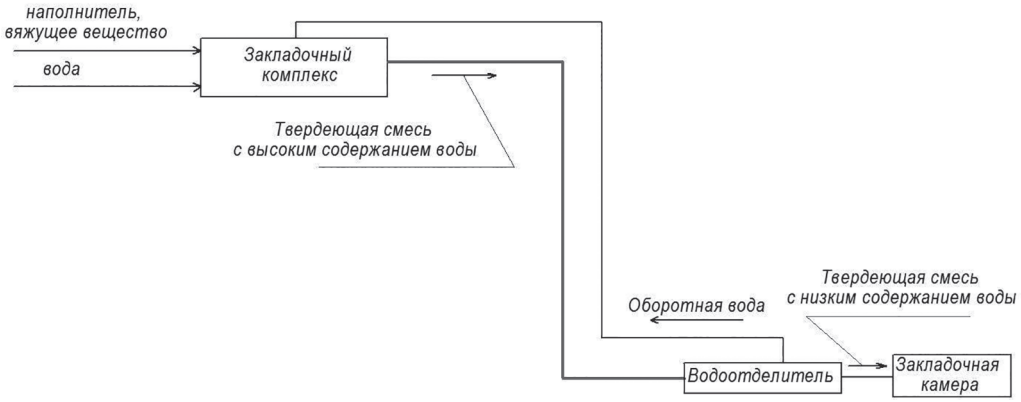


Рис. 1. Схема закладки с частичным оборотным водоснабжением
Fig. 1. Scheme of laying with partial circulating water supply

• содержание воды должно быть таким, чтобы обеспечить транспортирование по трубопроводу от закладочного комплекса до заполняемой горной выработки с наименьшим сопротивлением, что вынуждает использовать закладочную смесь с высоким содержанием воды.

Обсуждение

Для обеспечения эффективного процесса транспортирования твердеющей закладочной смеси целесообразно использовать объемные насосы, однако это приводит к увеличению удельных затрат на транспортирование [18].

Принимая во внимание явное противоречие требований к содержанию воды, рациональным является применение частичного оборотного водопотребления при закладочных работах [19]. Применение полного оборотного водопотребления при закладочных работах с твердеющими смесями невозможно, так как закладочная смесь должна иметь достаточную текучесть для заполнения полости выработанного пространства и достаточное содержание воды для набора требуемой прочности [20—22].

Для применения схемы частичного оборотного водопотребления необходимо разделить транспортную (магистральную) часть закладочного трубопровода с высоким содержанием воды с участковым закладочным трубопроводом с низким содержанием воды, а на пересечении этих двух участков установить водоотделитель для использования избыточной воды для дальнейшего приготовления закладочной гидросмеси (рис. 1).

Предложения

Для достижения этой цели в Санкт-Петербургском горном университете была разработана и запатентована конструкция мобильного закладочного устройства (МЗУ), предназначенного для закладки выработанного пространства твердеющими смесями с одновременным обезвоживанием закладочной пульпы, отводом отработанной воды и транспортированием сгущенной пульпы в выработанное пространство объемным насосом перистальтического действия [23].

Закладочная смесь может подаваться в выработанное пространство через специальные закладочные выработки по специальным вспомогательным выработкам, пройденным с вышележащего горизонта; по трубам, расположенным в выработках отрабатываемого горизонта. Полнота дозакладки заходок с большей вероятностью обеспечивается при подаче смеси по наклонному трубопроводу, проложенному непосредственно в вы-

работанном пространстве, а также закладке камер со слабонаклонной кровлей участками длиной 8—10 м в отступающем порядке через трубопроводы, выводимые за перемычки.

Транспортировка сгущенной твердеющей закладочной смеси производится с участка, расположенного в непосредственной близости от закладочной камеры, с помощью магнитного перистальтического насосного агрегата. Благодаря перемещению гидросмеси с низким напряжением сдвига посредством движения волн локальной деформации, вызываемых активатором насоса, становится возможным перекачивание гидросмеси с низким содержанием воды без существенной потери напора и расслоения пульпы. Это позволяет заметно снизить потребление свежей воды в процессе приготовления твердеющей смеси в закладочном устройстве.

Основным элементом системы оборотного водоснабжения, от которого зависит эффективность снижения водопотребления, является водоотделитель.

На сегодняшний день известны различные конструкции водоотделителей для закладочных работ. Принципиально они различаются отделением воды из гидросмеси за счет гравитационных или центробежных сил. Для обезвоживания закладочного материала часто используют водоотделители центробежного типа (дуговые и конические сита, гидроциклоны), смонтированные на шахтных вагонетках [24—27]. Однако их применение в удаленных выработках или при проведении работ по дозакладке выработанного пространства затруднено.

Разработанное устройство реализует инерционный принцип разделения вещества [28]. Гидросмесь, попадая в водоотделитель МЗУ, сталкивается с поверхностью гидродинамического профиля, замедляя свое движение, и, отклоняясь вниз, твердые частицы оседают на дно водоотделителя. Часть более мелких частиц может быть захвачена потоком жидкости и неизбежно столкнется со вторым гидродинамическим профилем, который, рассекая поток гидросмеси, вынуждает оседать твердые частицы на дно водоотделителя.

Комплект контрольно-измерительной аппаратуры (ККИА), устанавливаемый на выпускных патрубках водоотделителя, определяет параметры осветленной воды и передает сведения на активатор магнитного перистальтического насоса. Если в осветленной воде начинает регистрироваться повышенное содержание твердой фракции, перистальтический насос увеличивает подачу закладочной гидросмеси для предотвращения скапливания в водоотделителе твердой фракции и ее последующего вымывания в резервуар для сбора осветленной воды. В случае невозможности организации трубопроводной линии для возврата отделенной воды возможно предусмотреть сброс отделенной воды в водоотливную канавку. Аналогичным образом ККИА определяет параметры потока сгущенной закладочной смеси, поступающей в насосный агрегат. Для повышения концентрации твердых частиц в закладочной смеси активатор магнитного насосного агрегата снижает подачу перистальтического насоса.

Оценка эффективности работы оборудования проводилась на основе анализа распределения массовой доли и скоростей твердых частиц, а также картины распределения скоростей и векторов скоростей воды в выделенной области водоотделителя (рис. 2). Характер картины распределения массовой доли частиц в выделенной области соответствует механизму работы водоотделителя:

- однородный гетерогенный поток с начальными параметрами поступает в резервуар и взаимодействует с первым гидродинамическим профилем (область *A*);

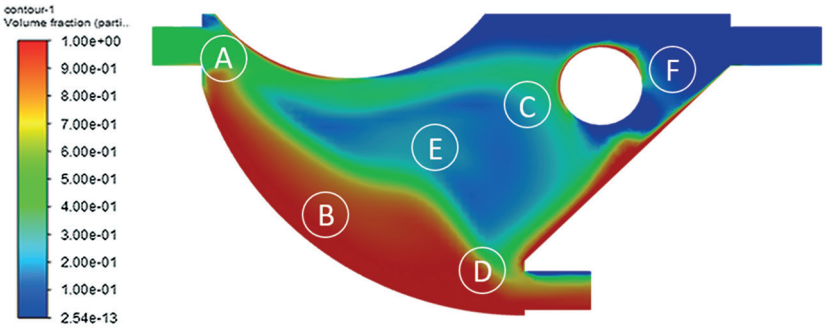


Рис. 2. Распределение плотности потока частиц в расчетной области
Fig. 2. Particle flux density distributions in the computational domain

- часть твердых частиц смеси теряют скорость и оседают на направляющую поверхность (область *B*);
- часть частиц сохраняют скорость потока и при дальнейшем движении сталкиваются со вторым гидродинамическим профилем, теряют скорость и оседают на стенки и дно резервуара (область *C*);
- в нижней части резервуара образуется слой сгущенной смеси, которая направляется в сливной патрубок (область *D*) и далее поступает в насосный агрегат.

Картина распределения скоростей частиц в расчетной области дополняет сведения о механизме функционирования МЗУ. Как показано на рис. 2, после взаимодействия с первым гидродинамическим профилем скорость частиц снижается более чем в два раза по сравнению со скоростью во входном патрубке. При этом формируются две обширные областии *E* и *F*. В области *E* скорость частиц достигает минимальных значений, что способствует их интенсивному оседанию, а область *F* является зоной накопления и обратного осаждения твердого компонента. Кроме того, вдоль области *B*, практически от входного патрубка, наблюдается движение потока части в направлении к выходному патрубку, что является следствием разрушения исходного потока смеси в результате взаимодействия с первым гидродинамическим профилем.

Форма области *C* позволяет предположить, что в результате взаимодействия со вторым гидродинамическим профилем происходит не только уменьшение значения скорости частиц, но и измене-

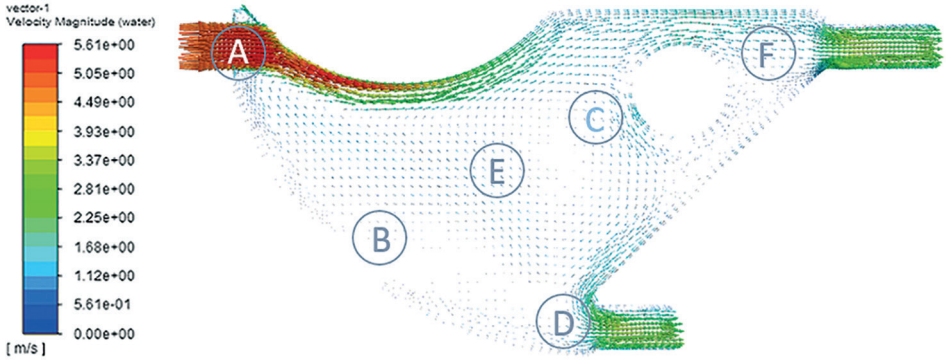


Рис. 3. Распределение скоростей водного потока в расчетной области
Fig. 3. Water flow velocity distributions in the calculation domain

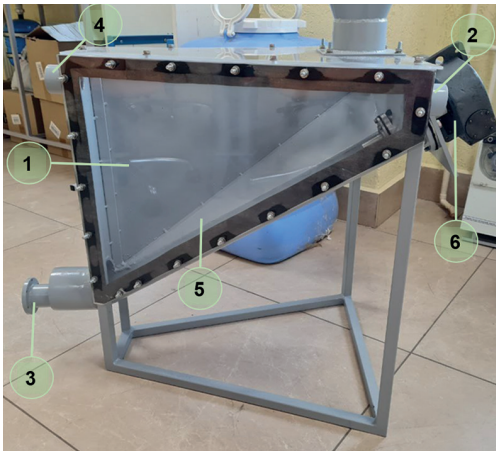
ние направления основного потока их движения [29]. Теперь частицы движутся вниз не только под действием силы тяжести, но и увлекаемые потоком осветленной воды, изменившим свое направление после взаимодействия со вторым гидродинамическим профилем, что дополнительно способствует выделению из потока гидросмеси твердых частиц.

Анализ картины распределения векторов скоростей жидкой фазы гидросмеси в расчетной области полностью соответствует механизму работы водоотделителя в части определения значений скорости потока и направления его движения [30]. Высокая скорость потока жидкой фазы на входе в водоотделитель после столкновения с гидродинамическим отклоняющим профилем резко снижается, и, переходя в широкую часть, из потока гидросмеси под действием сил инерции и сил тяжести интенсивно отделяется твердая фракция (рис. 3).

Разработанный узел водоотделителя позволяет реализовать возможность отведения осветленной воды из рабочей зоны через канал *4*, расположенный в рабочей зоне *1*. Для исключения уплотнения осажденных частиц гидросмеси в случае остановки работы секции насосного агрегата рекомендуется доукомплектование шнековым смесителем *5*, который позволяет поддерживать в подвижном состоянии твердые частицы гидросмеси в придонном слое (рис. 4).

Производительность водоотделителя зависит как от его габаритных размеров, характеризующих заполняемость, так и от скоростных режимов подачи и отведения гидросмеси, что в свою очередь оказывает влияние на концентрацию получаемой на выходе гидросмеси.

Для оценки влияния на работу узла водоотделителя выполнены исследования при варьировании различных параметров, характеризующих поступающую первичную гидросмесь. Оптимизация режима



1 – рабочая зона
2 – канал для первичной гидросмеси
3 – канал для подключения насосного агрегата
4 – канал для отвода осветленной воды
5 – расположение шнекового смесителя
6 – привод смесителя

Рис. 4. Узел водоотделения
Fig. 4. Water separation unit

работы выполнялась по параметру концентрации получаемой гидросмеси.

Выполнен анализ влияния скорости поступления гидросмеси в рабочую зону водоотделителя на концентрацию гидросмеси, поступающей в насосный агрегат для последующего перекачивания в выработанное пространство (рис. 5).

Полученные результаты позволили сделать вывод, что поток, поступающий в рабочую зону инерционного сгустителя со скоростью в пределах 1,5 м/с, позволяет обеспечить поступление в магнитный насосный агрегат сгущенной гидросмеси с концентрацией в пределах 70% и не допустить высокого уровня содержания твердой фракции в осветленном потоке оборотной воды. При достижении скоростью уровня около 2,5 м/с наблюдается скачок концентрации, достигающей пикового значения. Это связано с более быстрым накоплением осевшего сгущенного объема, предназначенного для поступления в насосный агрегат. Данный режим функционирования не является

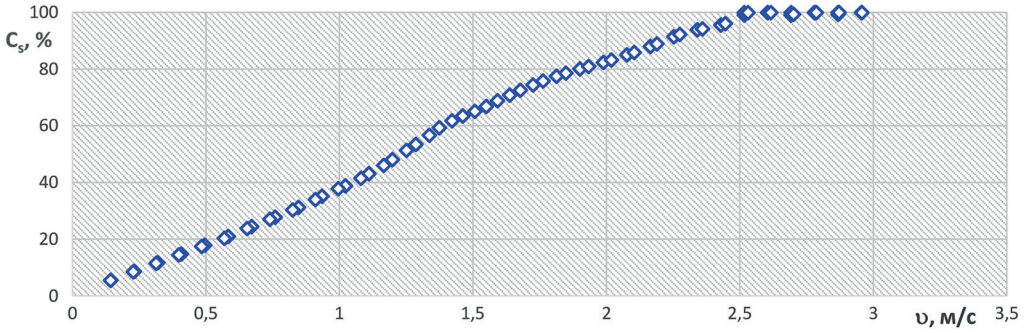


Рис. 5. Содержание твердых частиц в сгущенной гидросмеси в зависимости от скорости первичной гидросмеси, поступающей в водоотделитель

Fig. 5. The content of solid particles in the thickened slurry depending on the speed of the primary slurry entering the active zone of the water separator

рациональным и соответствует режиму перенасыщения. Для снижения негативных эффектов, таких как повышение выхода твердой фракции через сливной патрубок для осветленной жидкости, а также закупорки выходного отверстия для сгущенной гидросмеси, рекомендуется увеличивать производительность насосного агрегата, осуществляющего отбор сгущенной гидросмеси.

Также исследована динамика изменения концентрации сгущенной гидросмеси, поступающей в насосный агрегат для перекачивания в выработанное пространство, в зависимости от концентрации первичной гидросмеси, подаваемой в рабочую зону водоотделителя. Содержание твердой фракции в потоке сгущенной гидросмеси линейно возрастает с ростом концентрации первичной гидросмеси. Как видно из зависимости, представленной на рис. 6, поступление в насосный агрегат гидросмеси с концентрацией около 70% обеспечивается поступлением в рабочую зону водоотделителя потока с концентрацией твердой фракции около 40%.

Обращает внимание, что при достижении первичной гидросмесью концентрации около 60% наблюдается выполаживание графика зависимости, характеризующее переход к режиму перенасыщения.

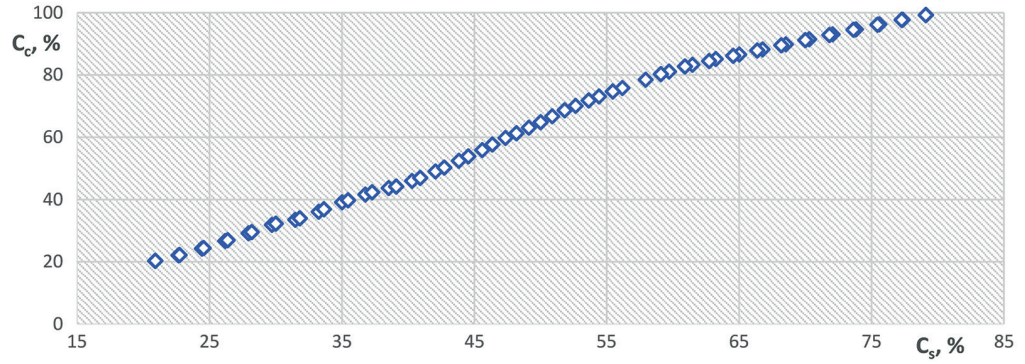


Рис. 6. Содержание твердых частиц в сгущенной гидросмеси в зависимости от концентрации первичной гидросмеси, поступающей в рабочую зону сгустителя

Fig. 6. The content of solid particles in the thickened slurry depending on the concentration of the primary slurry entering the active zone of the water separator

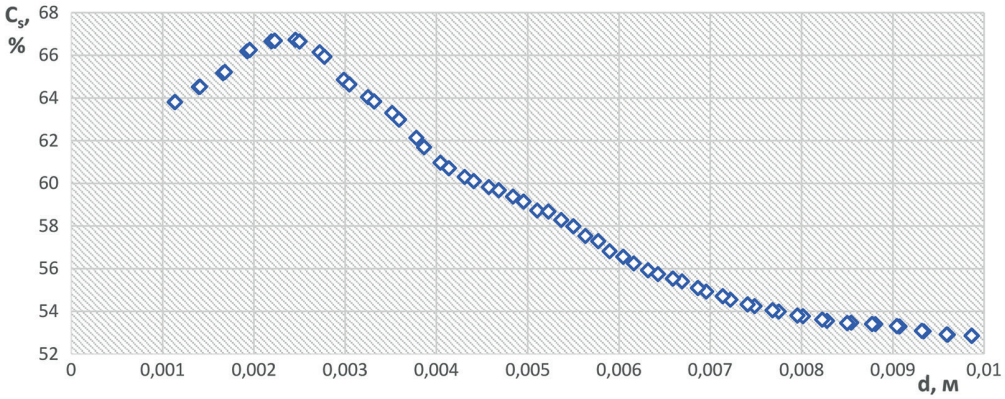


Рис. 7. Содержание твердых частиц в сгущенной гидросмеси в зависимости от крупности твердой фракции в первичной гидросмеси

Fig. 7. Content of solid particles in the thickened slurry depending on the size of solid fraction in primary slurry

При этом наблюдается накопление осажденной сгущенной гидросмеси на дне рабочей зоны, что может привести к закупорке выходного патрубка, соединенного с насосным агрегатом. Этот эффект может быть скомпенсирован повышением производительности насосного агрегата.

Как известно, закладочными материалами, обеспечивающими наименьшую усадку, являются пески, а также песчано-породная смесь. При закладке песками нижний предел крупности закладочного материала ограничивается классом 0 — 0,1 мм пылевато-глинистых частиц, содержание которого не должно превышать 30%. При закладке дроблеными породами содержание мелких фракций менее 1 мм из условия предотвращения их вымывания из закладочного массива не должна превышать 10%.

Выполненные исследования позволили оценить влияние крупности твердой фракции первичной гидросмеси, подаваемой в рабочую зону водоотделителя, на динамику изменения концентрации сгущенной гидросмеси, поступающей в насосный агрегат. В ходе эксперимента гидросмесь поступала в рабочую зону с постоянной скоростью 1,5 м/с, концентрация первичной гидросмеси составляла 40%. Крупность твердой фракции для каждого цикла определялась средним диаметром частиц в интервале от 0,1 до 10 мм. Анализ полученных результатов позволил сформулировать зависимость исследуемых параметров сгущения, представленную на рис. 7.

Как можно заключить из анализа зависимости, при поступлении гидросмеси со средним диаметром твердой фракции в пределах 0,002 м возможно обеспечить концентрацию гидросмеси, подаваемой в насосный агрегат, на уровне 67%. Повышение крупности частиц приводит к снижению концентрации подаваемой гидросмеси вследствие накапливания осажденного наполнителя на дне рабочей зоны и переводу функционирования водоотделителя в режим перенасыщения. Для предотвращения спрессовывания материала на дне и последующей закупорки выходного канала для сгущенной гидросмеси рекомендуется повысить производительность насосного агрегата.

Прочие факторы использовались для наложения соответствующих ограничений на объект. Для оценки влияния этих факторов составлена соответствующая матрица (рис. 8).

Комплексный анализ полученных результатов с применением модуля Ansys

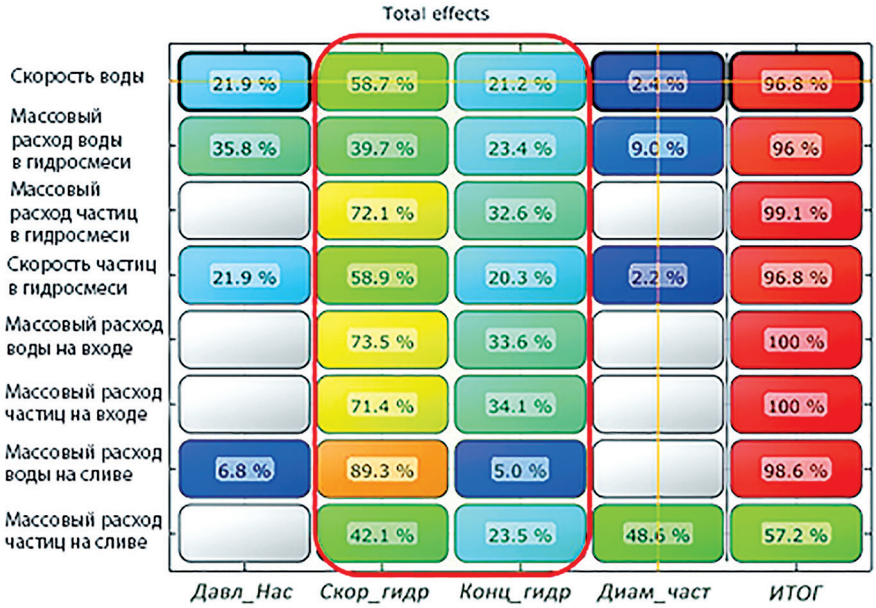


Рис. 8. Матрица влияния факторов и их весовые коэффициенты
Fig. 8. Matrix of influence of factors and their weighting coefficients

optiSLang позволил провести оценку чувствительности итоговых результатов к входным факторам и определить их весовой коэффициент.

Анализ представленной матрицы факторов позволяет заключить, что наибольшее влияние на параметры функционирования узла водоотделения оказывает параметр скорости поступления первичной гидросмеси. Он оказывает существенное влияние на все оцениваемые параметры. Его весовой коэффициент при оценке концентрации получаемой сгущенной гидросмеси составляет 0,72, а при оценке содержания твердой фракции в потоке осветленной воды — 0,43.

Заключение

Применение специального оборудования позволяет устранить противоречие требований к содержанию воды в закладочной смеси благодаря отведению избыточно содержащейся воды непосредственно перед выработанным пространством, реализации частичного оборотного водопотребления и перекачиванию сгущенной гидросмеси насосным агрегатом.

Обосновано применение для сгущения подаваемой в выработанное пространство гидросмеси конструкции водоотделителя, реализующего инерционный принцип работы и осуществляющего непрерывное разделение фаз гидросмеси посредством встроенных гидродинамических профилей. Благодаря реализации оперативного контроля и возможности гибкого регулирования производительности насосного агрегата при перекачивании сгущенной закладочной гидросмеси обеспечивается эффективное отведение твердой фракции гидросмеси на основе данных о плотностях сгущенной массы и отведение осветленной воды.

Формирование потока сгущенной гидросмеси с концентрацией в пределах 70% осуществляется при использовании первичной гидросмеси, поступающей в рабочую зону водоотделителя с концентрацией не ниже 40% при соблюдении установленной скорости в 1,5 м/с. Резуль-

таты исследований подтверждают, что концентрация сгущенной гидросмеси находится в линейной зависимости от скорости поступающей первичной гидросмеси. Средний диаметр твердой фракции, содержащийся в первичной гидросмеси, в пределах 0,002 м позволяет обеспечить концентрацию сгущенной гидросмеси, подаваемой в насос, на уровне 67%.

Авторы выражают искреннюю благодарность ведущему специалисту ПГР АО «Полиметалл УК» М.Д. Морозову за совместное заинтересованное обсуждение вопроса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мурзин Н. В.*, *Тальгамер Б. Л.* Сокращение водопотребления при дражной разработке россыпных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5-2. — С. 22—30. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_22.

2. *Субботин Ю. В.*, *Овешников Ю. М.*, *Авдеев П. Б.* Водоснабжение драг и очистка технологической воды при разработке россыпи «Средняя Борзя» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 2. — С. 58—68. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-58-68.

3. *Miller K. D.*, *Bentley M. J.*, *Ryan J. N.*, *Linden K. G.*, *Larison C.*, *Kienzle B. A.*, *Katz L. E.*, *Wilson A. M.*, *Cox J. T.*, *Kurup P.*, *Van Allsburg K. M.*, *McCall J.*, *Macknick J. E.*, *Talmadge M. S.*, *Miara A.*, *Sitterley K. A.*, *Evans A.*, *Thirumaran K.*, *Malhotra M.*, *Gonzalez S. G.*, *Stokes-Draut J. R.*, *Chellam S.* Mine water use, treatment, and reuse in the United States: a look at current industry practices and select case studies // ACS ES&T Engineering. 2022, vol. 2, no. 3, pp. 391—408. DOI: 10.1021/acsestengg.1c00244.

4. *Александров В. И.*, *Атрощенко В. А.*, *Ватлина А. М.* Определение фактических потерь напора при гидротранспорте хвостов ММС по стальным и футерованным полиуретаном пульповодам на Качканарском ГОКе // Обогащение руд. — 2021. — № 6. — С. 53—59. DOI: 10.17580/or.2021.06.09.

5. *Атрощенко В. А.*, *Авксентьев С. Ю.*, *Махараткин П. Н.*, *Труфанова И. С.* Экспериментальная гидротранспортная установка для определения стойкости материалов трубопроводов и деталей грунтовых насосов к гидроабразивному износу // Обогащение руд. — 2021. — № 3. — С. 39—45. DOI: 10.17580/or.2021.03.07.

6. *Арсентьев В. А.*, *Вайсберг Л. А.*, *Устинов И. Д.* Направление создания маловодных технологий и аппаратов для обогащения тонкоизмельченного минерального сырья // Обогащение руд. — 2014. — № 5. — С. 3—9.

7. *Арсентьев В. А. Вайсберг Л. А. Устинов И. Д. Герасимов А. М.* Перспективы сокращения использования воды при обогащении угля // Горный журнал. — 2016. — № 5. — С. 97—101.

8. *Vishniakov G., Pushkarev A.* Evaluation of modern equipment for automated control and maintenance systems for mine transport // International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering. 2021, vol. 326, article 00040, pp. 1—6. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600040.

9. *Michaux B., Hannula J., Rudolph M., Reuter M. A., Van den Boogaart K. G., Möckel R., Kobylin P., Hultgren M., Peltomäki M., Roine F., Remes F.* Water-saving strategies in the mining industry — The potential of mineral processing simulators as a tool for their implementation // Journal of Environmental Management. 2019, vol. 234, pp. 546—553. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.139.

10. *He W., Qiuyu C., Hualong D.* Modeling and optimization of water distribution in mineral processing considering water cost and recycled water // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022, vol. 2022, pp. 1—12. DOI: 10.1155/2022/2314788.

11. *Шадрунова И. В.*, *Чекушина Т. В.*, *Богданович А. В.* Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного сырья в рамках Евразийского экономического союза (Плаксинские чтения-2014) // Обогащение руд. — 2014. — № 6.

12. *Vasichev S.* Ground control with backfill and caving in deep-level mining of gently dipping ore bodies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 523, no. 1, article 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/523/1/012022.

13. *Sivakugan N., Rankine K., Rankine R.* Geotechnical aspects of hydraulic filling of underground mine stopes in Australia // Elsevier Geo-Engineering Book. 2015, vol. 3, pp. 83—109. DOI: 10.1016/S1571-9960(05)80021-7.

14. *Кисляков В. Е.* Создание ресурсосберегающих и экологически щадящих технологий при разработке россыпных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 1997. — № 5. — С. 117—119.

15. *Kuskova Ya. V.*, *Lipnitsky N. A.* Mechanical properties and mineralogical composition of potash ore as a factor in selecting the processing method // Materials Science Forum. 2021, vol. 1022, pp. 17—26. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1022.17.

16. *Zhao K., Li Q., Yan Y.* Numerical calculation analysis of the structural stability of cemented fill under different cement-sand ratios and concentration conditions // Advances in Civil Engineering. 2018, vol. 2018, no. 1, pp. 1—9. DOI: 10.1155/2018/1260787.

17. *Altrun O., Toprak N.* Considering hydrocyclone operation for tailings dewatering purpose and its effects on product specifications of paste backfill operations // Minerals Engineering. 2021, vol. 173. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107176.

18. *Овчинников Н. П.*, *Портнягина В. В.*, *Дамбуев Б. И.* Установление предельного технического состояния пульпового насоса без разборки // Записки Горного института. — 2020 — Т. 241 — С. 53—57. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.53.

19. *Александров В. И.*, *Васильева М. А.* Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидротранспорта // Записки Горного института. — 2018. — Т. 233. — С. 471—479. DOI: 10.31897/pmi.2018.5.471.

20. *Wang R., Zeng F., Li L.* Applicability of constitutive models to describing the compressibility of mining backfill: a comparative study // Processes. 2021, vol. 9, no. 12, article 2139. DOI: 10.3390/pr9122139.

21. *Newman Ch., Agioutantis Z.* Stress redistribution around single and multiple stope-and-fill operations / Conference: 52nd US Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, Seattle WA. 2018, pp. 18—730.

22. *Rošer J., Potočnik D., Vulic M.* Analysis of dynamic surface sudsidence at the underground coal mining site in Velenje, Slovenia through modified sigmoidal function // Minerals. 2018, vol. 8, no. 74, pp. 1—13. DOI: 10.3390/min8020074.

23. *Vasilyeva M. A.* Magnetic peristaltic pumps for backfill // Eurasian Mining. 2019, no. 1, pp. 34—36. DOI: 10.17580/em.2019.01.08.

24. *Дробаденко В. П.*, *Малухин Н. Г.*, *Мальцев Г. Б.* Совершенствование технологии добычи техногенного сырья из хвостохранилищ ВГГМК / Международная конференция «Новые достижения в науках о Земле». Тезисы докладов. — М., 1996. — 218 с.

25. *Schoderer M., Karthe, D., Dombrowsky I., Dell'Angelo J.* Hydro-social dynamics of miningscapes: Obstacles to implementing water protection legislation in Mongolia // Journal of Environmental Management. 2021, vol. 292, no. 5, article 112767. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112767.

26. *Latysheva M. A.* Problemsand perspectives of the ineffective gold-bearing deposits development // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 629, no. 1, article 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/629/1/012028.

27. *Huayan Pian, Santosh M.* Gold deposits of China: Resources, economics, environmental issues, and future perspectives // Geological Journal. 2020, vol. 55, no. 8, pp. 5978 — 5989. DOI: 10.1002/gj.3531.

28. *Cheremisina O., Sergeev V., Ponomareva M., Ilina A., Fedorov A.* Kinetics Study of solvent and solid-phase extraction of rare earth metals with Di-2-Ethylhexylphosphoric acid // Metals. 2020, vol. 10, no. 5, article 687. DOI: 10.3390/met10050687.

29. *Чернышов С. Е., Галкин В. И., Ульянова З. В., Макдоналд Д. И. М.* Разработка математических моделей управления технологическими параметрами тампонажных растворов // Записки Горного института. — 2020. — Т. 242. — С. 179 — 190. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.179.

30. *Antaya C. L., Adane K. F.* K., *Sanders R. S.* Modelling concentrated slurry pipeline flows / Proceedings of the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. Vol. 1: Symposia, Parts A and B. Rio Grande, Puerto Rico, USA. 2012, pp. 1659 — 1671. DOI: 10.1115/FEDSM2012-72379. ГИАБ

REFERENCES

1. Murzin N. V., Talgamer B. L. Reduction of water consumption during dredge development of placer deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 22 — 30. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_22.

2. Subbotin Yu. V., Oveshnikov Yu. M., Avdeev P. B. Water supply of dredges and process water purification at placer mining Srednaya Borzya. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 2, pp. 58 — 68. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-58-68.

3. Miller K. D., Bentley M. J., Ryan J. N., Linden K. G., Larison C., Kienzle B. A., Katz L. E., Wilson A. M., Cox J. T., Kurup P., Van Allsburg K. M., McCall J., Macknick J. E., Talmadge M. S., Miara A., Sitterley K. A., Evans A., Thirumaran K., Malhotra M., Gonzalez S. G., Stokes-Draut J. R., Chellam S. Mine water use, treatment, and reuse in the United States: a look at current industry practices and select case studies. *ACS ES&T Engineering.* 2022, vol. 2, no. 3, pp. 391 — 408. DOI: 10.1021/acsestengg.1c00244.

4. Alexandrov V. I., Atroshchenko V. A., Vatlina A. M. Determination of actual head losses at hydrotransport of MMC tailings by steel and polyurethane lined pulp pipes at Kachkanarsky OEP. *Obogashchenie Rud.* 2021, no. 6, pp. 53 — 59. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.06.09.

5. Atroshchenko V. A., Avksent'ev S. Yu., Maharatkin P. N., Trufanova I. S. Experimental hydrotransport unit to determine the resistance of piping materials and parts of soil pumps to hydroabrasive wear. *Obogashchenie Rud.* 2021, no. 3, pp. 39 — 45. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.03.07.

6. Arsentiev V. A., Weisberg L. A., Ustinov I. D. The direction of the creation of low-water technologies and apparatus for the enrichment of finely divided mineral raw materials. *Obogashchenie Rud.* 2014, no. 5, pp. 3 — 9. [In Russ].

7. Arsentiev V. A. Vaysberg L. A. Ustinov I. D. Gerasimov A. M. Prospects for reducing the use of water in coal enrichment. *Gornyi Zhurnal.* 2016, no. 5, pp. 97 — 101. [In Russ].

8. Vishniakov G., Pushkarev A. Evaluation of modern equipment for automated control and maintenance systems for mine transport. *International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering.* 2021, vol. 326, article 00040, pp. 1 — 6. DOI: 10.1051/e3sconf/202132600040.

9. Michaux B., Hannula J., Rudolph M., Reuter M. A., Van den Boogaart K. G., Möckel R., Kobylin P., Hultgren M., Peltomäki M., Roine F., Remes F. Water-saving strategies in the mining industry — The potential of mineral processing simulators as a tool for their implementation. *Journal of Environmental Management.* 2019, vol. 234, pp. 546 — 553. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.139.

10. He W., Qiuyu C., Hualong D. Modeling and optimization of water distribution in mineral processing considering water cost and recycled water. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2022, vol. 2022, pp. 1—12. DOI: 10.1155/2022/2314788.

11. Shadrunova I. V., Chekushina T. V., Bogdanovich A. V. Progressive methods of enrichment and complex processing of natural and technogenic raw materials within the framework of the Eurasian Economic Union (Plaksinsky Readings-2014). *Obogashchenie Rud*. 2014, no. 6. [In Russ].

12. Vasichev S. Ground control with backfill and caving in deep-level mining of gently dipping ore bodies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 523, no. 1, article 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/523/1/012022.

13. Sivakugan N., Rankine K., Rankine R. Geotechnical aspects of hydraulic filling of underground mine stopes in Australia. *Elsevier Geo-Engineering Book*. 2015, vol. 3, pp. 83—109. DOI: 10.1016/S1571-9960(05)80021-7.

14. Kislyakov V. E. Creation of resource-saving and environmentally friendly technologies in the development of placer deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 1997, no. 5, pp. 117—119. [In Russ].

15. Kuskova Ya. V., Lipnitsky N. A. Mechanical properties and mineralogical composition of potash ore as a factor in selecting the processing method. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1022, pp. 17—26. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1022.17.

16. Zhao K., Li Q., Yan Y. Numerical calculation analysis of the structural stability of cemented fill under different cement-sand ratios and concentration conditions. *Advances in Civil Engineering*. 2018, vol. 2018, no. 1, pp. 1—9. DOI: 10.1155/2018/1260787.

17. Altrun O., Toprak N. Considering hydrocyclone operation for tailings dewatering purpose and its effects on product specifications of paste backfill operations. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 173. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107176.

18. Ovchinnikov N. P., Portnyagina V. V., Dambuev B. I. Specifying the technical state limit value of the pump pulp without disassembling. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 53—57. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.53.

19. Aleksandrov V. I., Vasilyeva M. A. Hydraulic transportation of thickened tailings of iron ore processing at Kachkanarsky GOK based on results of laboratory and pilot tests of hydrotransport system. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 233, pp. 471—479. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2018.5.471.

20. Wang R., Zeng F., Li L. Applicability of constitutive models to describing the compressibility of mining backfill: a comparative study. *Processes*. 2021, vol. 9, no. 12, article 2139. DOI: 10.3390/pr9122139.

21. Newman Ch., Agioutantis Z. Stress redistribution around single and multiple stope-and-fill operations. *Conference: 52nd US Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, Seattle WA*. 2018, pp. 18—730.

22. Rošer J., Potočnik D., Vulic M. Analysis of dynamic surface sudsidence at the underground coal mining site in Velenje, Slovenia through modified sigmoidal function. *Minerals*. 2018, vol. 8, no. 74, pp. 1—13. DOI: 10.3390/min8020074.

23. Vasilyeva M. A. Magnetic peristaltic pumps for backfill. *Eurasian Mining*. 2019, no. 1, pp. 34—36. DOI: 10.17580/em.2019.01.08.

24. Drobadenko V. P., Malukhin N. G., Maltsev G. B. Improving the technology of extraction of technogenic raw materials from the tailings of VGGMK. *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Novye dostizheniya v naukakh o Zemle». Tezisy dokladov* [International conference «New achievements in Earth sciences». Abstracts], Moscow, 1996, 218 p. [In Russ].

25. Schoderer M., Karthe, D., Dombrowsky I., Dell'Angelo J. Hydro-social dynamics of mining scapes: Obstacles to implementing water protection legislation in Mongolia. *Journal of Environmental Management*. 2021, vol. 292, no. 5, article 112767. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112767.

26. Latysheva M. A. Problemsand perspectives of the ineffective gold-bearing deposits development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 629, no. 1, article 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/629/1/012028.

27. Huayan Pian, Santosh M. Gold deposits of China: Resources, economics, environmental issues, and future perspectives. *Geological Journal*. 2020, vol. 55, no. 8, pp. 5978—5989. DOI: 10.1002/gj.3531.

28. Cheremisina O., Sergeev V., Ponomareva M., Ilina A., Fedorov A. Kinetics Study of solvent and solid-phase extraction of rare earth metals with Di-2-Ethylhexylphosphoric acid. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 5, article 687. DOI: 10.3390/met10050687.

29. Chernyshov S. E., Galkin V. I., Ulyanova Z. V., Macdonald D. I. Development of mathematical models to control the technological properties of cement slurries. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 179—190. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.179.

30. Antaya C. L., Adane K. F. K., Sanders R. S. Modelling concentrated slurry pipeline flows. *Proceedings of the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. Vol. 1: Symposia, Parts A and B. Rio Grande, Puerto Rico, USA. 2012, pp. 1659—1671. DOI: 10.1115/FEDSM2012-72379.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васильева Мария Александровна[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: saturn.sun@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2594-74810,
Волчихина Александра Алексеевна[1] — аспирант,
e-mail: alexandravolchihina@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7142-1935,
Кускильдин Рафис Бурибаевич[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: kuskildin_rb@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0487-4413,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Волчихина А.А., e-mail: alexandravolchihina@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Vasilyeva[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: saturn.sun@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2594-74810,
A.A. Volchikhina[1], Graduate Student,
e-mail: alexandravolchihina@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7142-1935,
R.B. Kuskildin[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: kuskildin_rb@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0487-4413,
[1] Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.A. Volchikhina, e-mail: alexandravolchihina@yandex.ru.

Получена редакцией 08.06.2022; получена после рецензии 31.01.2023; принята к печати 10.03.2023.
Received by the editors 08.06.2022; received after the review 31.01.2023; accepted for printing 10.03.2023.