

Безопасная технология внешнего отвалообразования при открытой разработке месторождений сульфидных руд

¹ГАБАЙДУЛЛИН Равгат Ибрагимович, к.т.н., зам. директора, gabaydullin_r@mail.ru,

²*АЛЪЖАНОВ Рустем Хайруллаевич, исполнительный директор, Alrus1983@mail.ru,

¹ТОО «Научно-инженерный центр «Геомарк», Казахстан, Караганда, ул. Терешковой, 18/2,

²ТОО «Bastau Expert», Казахстан, Караганда, пр. Бухар-Жырау, 51/4,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В статье исследованы проблемы оптимальной технологии внешнего отвалообразования при открытой разработке пожароопасных сульфидных руд карьера Дальнезападный Жайремского месторождения. Отвал из самовозгорающихся руд и вмещающих пород не только становится экологической проблемой, но со временем теряет устойчивость. Возникновение очагов самовозгорания внутри отвала может привести к взрывным последствиям. Для исследования этих опасных явлений в статье приведены результаты численного моделирования, получены количественные оценки процессов окисления и самонагревания пород отвальной массы, снижения прочностных свойств пород отвала и коэффициента запаса устойчивости бортов отвала. Представлены результаты исследований на численной модели положительного влияния профилактических мер по предупреждению самонагревания руд и пород на повышение устойчивости внешнего породного отвала. Особое внимание уделено обработке отвальной массы антипирогенами, уплотнению слоев для снижения их проницаемости и созданию экранирующих слоев между ярусами отвала. На основе результатов моделирования рассмотрены процессы оптимальной технологии формирования внешнего породного отвала для условий карьера Дальнезападный.

Ключевые слова: карьер, внешний породный отвал, сульфидная руда, окисление, самонагревание, проницаемость, антипироген, устойчивость, экранирующий слой.

Введение

Внешнее отвалообразование при открытой разработке твердых полезных ископаемых всегда было одним из наиболее важных проблем в разных аспектах. Сульфидные руды, а также вмещающие их горные породы, зачастую пожароопасны [1, 2], что создает дополнительные трудности для обеспечения безопасности отвала на длительный период эксплуатации карьера. Разработка технологии формирования устойчивых отвалов является сложной, многоплановой задачей, решение которой связано со взаимоувязкой процессов горного производства, с учетом особенностей механики массива разрыхленных пород при оптимальных для конкретных условий основных параметрах отвалов.

Такая задача решается для условий карьера Дальнезападный при разработке склонных к самовозгоранию руд Жайремского месторождения. Основным фактором, который необходимо учитывать при выборе устойчивых параметров внешнего породного отвала в условиях карьера, становится воздействие самоогревания и самовозгорания отвальной массы на устойчивость

бортов отвала. Горная масса при складировании в отвал включает контактные с рудой вмещающие породы, которые тоже склонны к самовозгоранию, и неизбежно определенную часть руды. Тепловые процессы при окислении разрыхленной отвальной массы изменяют ее физико-механические и прочностные свойства и, как следствие, приводят к потере устойчивости отвала.

В этой связи исследования для обоснования оптимальных параметров внешнего отвалообразования склонных к самовозгоранию пород становятся актуальной задачей при проектировании процессов открытой добычи сульфидных руд.

Методика исследования

Для оценки температурного фона в результате окисления рудно-породной массы отвала потоками воздуха, в рамках исследований участка Дальнезападный, принята методика, в основу которой положено решение уравнений теплового баланса:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{выд}} - Q_{\text{пород}} - Q_{\text{возд}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{выд}}$ – количество теплоты, выделившейся в результате реакции окисления отвальной массы,

в зависимости от теплофизических показателей и режима окисления;

$Q_{\text{пород}}$ – количество тепловой энергии, поглощаемой вмещающими породами в результате процесса теплопроводности, Дж;

$Q_{\text{возд}}$ – количество тепловой энергии, выносимой потоком воздуха, Дж;

$Q_{\text{нагр}}$ – количество теплоты, расходуемой на нагрев массива, состоящего из различных руд и пород, Дж.

По приведенной методике выполнено численное моделирование распределения расчетного поля температуры внутри отвальной массы из смеси руды и вмещающих пород внешней и/или внутренней вскрыши. Приняты следующие модельные параметры при окислении и самонагревании смеси руды и породы:

- отвал формируется складированием смеси наиболее пожароопасных видов руды и пород с высокими сорбционными свойствами: смешанная свинцово-цинковая руда с прослойками глобулярного пирита: константа скорости сорбции кислорода $U = 24,48 \cdot 10^{-10}$ м³/кг·с; температурный коэффициент скорости сорбции $E = 1,93 \cdot 10^{-10}$ м³/кг·с·К; углисто-глинисто-карбонатная порода: константа скорости сорбции кислорода $U = 25,87 \cdot 10^{-10}$ м³/кг·с; температурный коэффициент скорости сорбции $E = 0,36 \cdot 10^{-10}$ м³/кг·с·К;

- отвал состоит из двух ярусов, условно названных «нижний слой» и «верхний слой»;

- отвальная масса формируется приблизительно соотношением количества руды к количеству породы как 1:10 (за неимением более точных соотношений на практике);

- удельная теплота окисления руды, $q = 11,35$ Дж/м³;

- начальная температура отвальной массы $T = 293^\circ\text{K}$ (20°C).

С целью исследования динамики самонагрева на численной модели представляет интерес распределение температуры в отвале **через 5-7 лет**. На рисунке приведена динамика нарастания температуры самонагрева отвальной массы за 7 лет.

Опыт организации внешних породных отвалов при разработке открытым способом месторождений твердых горючих полезных ископаемых показал, что, если не принимать необходимые меры, отвалы практически всегда загораются, вопрос только времени. Загораются штабели угля, временные хранилища руды или угля в разные сезонные периоды.

В исследованиях [5, 6] установлено, что при высоких температурах происходит процесс химического выветривания пород как одна из основных причин потери прочности из-за тепловых изменений. Использование результатов приведенных работ позволило рассчитать, что в предположении самонагрева складированных во внешний отвал самовозгораемых пород до температур $200-220^\circ\text{C}$ снижение прочностных свойств пород будет характеризоваться следующими показателями:

- для покрывающих пород: прочность на одноосное сжатие $\sigma_{\text{сж}} = 15-25$ МПа; на растяжение $\sigma_{\text{р}} = 1,3-2,7$ МПа; сцепление $K = 0,06$ МПа; угол внутреннего трения $\rho = 8^\circ, 5$;

- для скальных пород: прочность на одноосное сжатие $\sigma_{\text{сж}} = 25-47$ МПа; на растяжение $\sigma_{\text{р}} = 2,3-3,3$ МПа; сцепление $K = 3,3$ МПа; угол внутреннего трения $\rho = 8^\circ$.

Моделирование [5] устойчивости бортов отвала с учетом снижения показателей прочностных и сдвиговых свойств пород показало следующее. При исходных условиях формирования из самовозгораемых пород отвал из одного яруса высотой до 18 м через 5-7 лет будет иметь коэф-

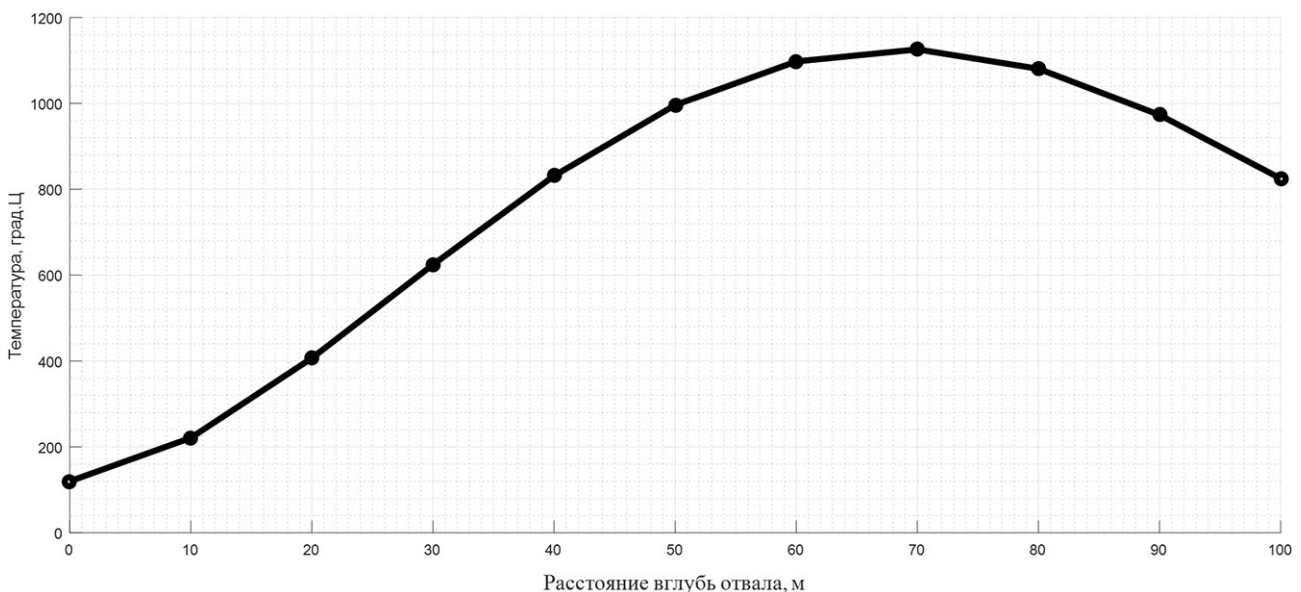


График нарастания температуры ($^\circ\text{C}$) самонагрева в глубине отвала за время 7 лет стояния отвала (интервал глубины – 10 м)

фициент запаса устойчивости от 1,03 до 1,24 при ширине площадки от 26 до 30 м (таблица 1). Это означает, что даже при значительных размерах рабочих площадок отвал будет в состоянии предельного равновесия. Проведенное исследование показывает отрицательное влияние нагревания самовозгорающихся пород на устойчивость отвальной массы.

Другим фактором, которым можно управлять в процессе самонагрева при формировании и эксплуатации отвалов из самовозгорающихся пород, это фильтрационные свойства отвальной массы [6]. Эти свойства, в первую очередь, зависят от проницаемости складированной отвальной массы. Пористость и проницаемость отвальной массы во многом определяют приток кислорода воздуха и тем самым, окислительные и температурные процессы в теле отвала.

Наиболее простым считается простое механическое уплотнение каждого отсыпаемого слоя яруса отвала тяжелыми бульдозерами с широкими гусеницами, специальными тяжелыми катками и т.п. Такое уплотнение мелкодисперсных пород значительно снижает проницаемость отвальной массы и, тем самым, доступ кислорода воздуха для окисления, теплопередачу от более нагретой части отвала к менее нагретой.

Авторами исследования [4] установлены зависимости коэффициента проницаемости грунта от степени его уплотнения, выраженные аналитическими формулами: для увлажненного грунта

$$K = 1,16 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-17,7 \cdot E), \quad (2)$$

для неувлажненного грунта

$$K = 3,15 \cdot 10^{-7} \cdot \exp(-24,4 \cdot E), \quad (3)$$

где E – показатель уплотнения грунта, выражающий отношение сплошной поверхности к суммарной поверхности всех открытых частей, доли;

K – коэффициент проницаемости грунта, м².

В целях снижения самонагрева, при всех способах добычи самовозгорающихся твердых полезных ископаемых, используют химические реагенты – антипирогены различного вида и состава. Наиболее известными и применяемыми считаются хлористый кальций, хлорная известь, гашеная известь, жидкое стекло, мочевины. Некоторые из них оказывают двойное действие: тор-

мозят химический процесс окисления и одновременно создают на поверхности кусков руды или породы пленку, препятствующую проникновению кислорода воздуха.

Принимая во внимание обозначенные причины самонагрева пород отвальной массы, факторы управления окислительными процессами, влияние их на устойчивость внешнего породного отвала, разработка оптимальной технологии отвалообразования самовозгораемых горных пород карьера «Дальнезападный» должна включать обязательные профилактические мероприятия. Для оценки эффективности их реализации выполнены исследования на численной модели поведения модели внешнего породного отвала и в конечном итоге его устойчивости.

Снижение химической активности отвальной массы. Для рудной отвальной массы смоделирована обработка разрыхленной отвальной массы антипирогеном – 10%-ным раствором гашеной извести с добавкой поверхностно-активных веществ. При этом достигается снижение скорости сорбции до 35% и, как следствие, температуры самонагрева. Расход раствора или суспензии антипирогена составляет порядка 20-30 л на 1 м³ породы.

Снижение проницаемости отвальной массы путем механического уплотнения каждого отсыпаемого слоя яруса отвала тяжелыми бульдозерами с широкими гусеницами, специальными тяжелыми катками и т.п. Моделирование такого профилактического способа позволяет снизить проницаемость отвальной массы из обломочных песчаников, известняков, алевролитов до $(0,1-10) \cdot 10^{-11}$ м². За счет этого уменьшается поступление кислорода воздуха к породам и руде отвальной массы, что приводит к снижению генерации тепловой энергии окисления.

Создание плотных изолирующих экранов из негорючих компонентов – эффективный способ предупреждения самовозгорания породных отвалов. В соответствии с теорией теплопередачи процесс передачи теплоты из первой среды (более нагретой) через перегородку (изолирующий слой) к второй (менее нагретой) описывается единым уравнением

$$\frac{Q}{S \cdot \tau} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = \Delta T, \quad (4)$$

Таблица 1 – Расчетные параметры ярусов внешнего породного отвала

Высота яруса, м	Ширина площадки, м	Коэффициент запаса устойчивости
18	26	1,03
18	27	1,08
17	28	1,14
17	29	1,20
17	30	1,24

где Q – количество передаваемой теплоты, Дж;
 S – площадь сечения теплового потока, м²;
 α_1 – коэффициент теплоотдачи от первой среды к изолирующему слою, Вт/м²·°К;
 λ – коэффициент теплопроводности изолирующего слоя, Вт/м·°К;
 α_2 – коэффициент теплоотдачи от изолирующего слоя к второй среде, Вт/м²·°К;
 δ – размер (толщина) изолирующего слоя (перегородки), м;
 ΔT – разность температур между первой и второй средой, °К;
 τ – время, в течение которого происходит выравнивание температур, с.

При численном моделировании принято, что изменение толщины δ инертного слоя в 10 раз (от 0,1 м до 1,0 м) увеличивает приведенное время процесса теплопередачи (выравнивание температур между слоями) в 1,3 раза; увеличение в 20 раз (до 2,0 м) – в 2,2 раза.

Уменьшение времени контакта породы с кислородом воздуха. Одним из технологических способов предупреждения самовозгорания служит формирование отвалов без выступов в угловых частях, придание отвалам округлой формы (создание плавного перехода между сторонами отвала, между откосами и горизонтальными частями).

Наиболее опасными в отношении самовозгорания и горения являются хребтовидные отвалы. Кроме того, с увеличением высоты отвала любого вида степень подверженности горению возрастает. В связи с этим, предпочтительнее отсыпать отвалы плоской формы небольшой высоты. Рекомендуется также выполаживание откосов породных отвалов (угол откоса не должен превышать 20-25°). Это в 1,5-2 раза снижает перепады давлений под действием ветра.

Исходя из вышеприведенных способов снижения окислительных процессов и температуры самонагрева, выполнены исследования устойчивости ярусов и отвала в целом при следующих показателях физико-механических свойств отвальной массы: сцепление $K=0,04$ МПа; угол внутреннего трения $\rho=24^\circ$; угол наклона яруса $\rho=35^\circ$; объемный вес $\gamma=2,0$ т/м³. Наибольшая расчетная температура самонагрева отвальной массы составляет порядка 60-70°С. Моделирование позволило получить оценки коэффициента запаса устойчивости бортов отвала, результаты которого приведены в таблице 2.

Из результатов расчетов таблицы 2 следует, что при условии применения профилактических мероприятий по предупреждению интенсивного окисления и самонагрева складываемых в отвал склонных к самовозгоранию смеси руды и пород, последние в целом сохраняют первоначальные физико-механические и прочностные свойства и, как следствие, ярусы и отвал в целом будут устойчивы с коэффициентом запаса не менее 1,3.

Обсуждение результатов

Добыча открытым способом горючих и склонных к самовозгоранию твердых горючих ископаемых – угля, сланцев, сульфидных руд связана с длительным хранением во внешних отвалах вмещающих пород. Кроме экологических проблем от самовозгорания приходится решать задачи обеспечения устойчивости бортов отвала. Высокие температуры от самонагрева отвальной массы снижают физико-механические и прочностные свойства пород отвала, что приводит к деформациям бортов. На карьере Дальнезападный Жайремского месторождения сульфидных руд используется транспортное отвалообразование. Сульфидные руды и вмещающие на контактах породы тоже склонны к самовозгоранию. Без принятия определенных мероприятий температура самонагрева отвальной массы может достичь опасных величин и привести к разрушению отвала. Численным моделированием показано, что реализация доступных профилактических способов снижения окислительных процессов – обработка антипирогенами, уплотнение слоев для снижения проницаемости, укладка экранирующих слоев из инертных пород, формирование плавных переходов конфигурации отвала – позволяют значительно уменьшить самонагревание и обеспечить устойчивую эксплуатацию отвала.

Выводы

Самовозгорание сульфидных руд Жайремского месторождения вызывает проблемы как при ведении добычных работ на карьере, так и при организации и эксплуатации внешних породных отвалов.

Самонагревание рудо-породной отвальной массы вызывает значительные снижения прочностных и сдвиговых свойств пород, возникновение внутренних высокотемпературных очагов,

Таблица 2 – Расчетные параметры ярусов внешнего породного отвала

Высота яруса, м	Ширина площадки, м	Коэффициент запаса устойчивости
17	22	1,31
17	25	1,39
17	28	1,47
17	31	1,57

способствующих потере устойчивости отвала.

Установлено, что численное моделирование процессов окисления и самонагрева позволяет с достаточной инженерной точностью рассчитать параметры температурного поля внутри отвальной массы. Использование термофизических свойств руд и пород месторождения, размеров и форм элементов внешнего отвала, численное моделирование на основе тепловых законов физики позволили сделать следующие выводы:

- без применения специальных мер температура самонагрева смеси отвальной массы из самовозгораемых руд и пород может достичь величин, способных привести к разрушению ярусов и бортов отвала;

- впервые получены оценки температурного

поля внутри отвала, снижения физико-механических и прочностных свойств самовозгораемых отвальных пород;

- численным моделированием получены количественные показатели положительного влияния профилактических мер на предупреждение самонагрева отвальной массы и увеличение запаса устойчивости бортов отвала до нормативных величин;

- оптимальная технология отвалообразования и практическая реализация доступных способов предупредительных мероприятий обеспечит безопасную эксплуатацию внешнего породного отвала при разработке склонов к самовозгоранию сульфидных руд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габайдуллин Р.И., Нургалиева А.Д., Рахимберлина А.А. и др. Пожароопасность Орловского месторождения / Труды международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации плана нации» (Сагиновские чтения № 7). Ч. 2; Карагандинский государственный технический университет. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2015. С. 187-189.
2. Ходжаев Р.Р., Габайдуллин Р.И., Шарипов Н.Х. и др. К вопросу об экологических аспектах добычи сульфидных руд подземным способом / III Уральский международный экологический конгресс «Экологическая безопасность промышленных регионов». Екатеринбург: СОО ОО – МАНЭБ, Институт экономики УрО РАН, УГТУ, 2015. С. 152-156.
3. Алиев С.Б., Захаров В.Н., Кенжин Б.М. и др. Энергетическая модель самовозгорания углепородных отвалов / Уголь. М., 2018. Вып. 12. С. 86-91.
4. Качурин Н.М., Стась Г.В., Левин А.Д. и др. Аэродинамика породных отвалов угольных шахт // Известия ТулГУ. Науки о Земле. Тула, 2016. № 1. С. 3-23.
5. Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т., Турдубаева Ч.Е. Исследования влияния температуры на работу разрушения крепких горных пород / Кыргызский ГТУ им. И. Руззакова // Международный журнал прикладных и фундаментальных наук. Бишкек, 2019. № 11. С. 101-104.
6. Липатов И.В. Влияние тепловых ударов на прочностные свойства горных пород // Доклады АН ВШ РФ. Новосибирск, 2020, № 4 (49). С. 32-40.

Сульфидті кен орындарын ашық игеру кезінде сыртқы үйіндіні түзудің қауіпсіз технологиясы

¹ГАБАЙДУЛЛИН Равгат Ибрагимович, т.ғ.к., директор орынбасары, gabaydullin_r@mail.ru,

²*АЛЬЖАНОВ Рустем Хайруллаевич, атқарушы директор, Alrus1983@mail.ru,

¹«Геомарк» ғылыми-инженерлік орталығы» ЖШС, Қазақстан, Қарағанды, Терешкова көшесі, 18/2,

²«Bastau Expert» ЖШС, Қазақстан, Қарағанды, Бұқар-Жырау даңғылы, 51/4,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақалада Жәйрем кенорнының «Дальнезападный» карьерінің өртке қауіпті сульфидті кендерін ашық игеру кезінде сыртқы үйіндіні түзудің оңтайлы технологиясының мәселелері зерттелген. Өздігінен тұтанатын кендерден және сыйымды таужыныстардан жасалған үйінді экологиялық проблемаға айналып қана қоймай, уақыт өте келе орнықтылығын жоғалтады. Үйінді ішінде өздігінен тұтану ошақтарының пайда болуы жарылыс салдарына әкелуі мүмкін. Осы қауіпті құбылыстарды зерттеу үшін мақалада сандық модельдеудің нәтижелері келтірілген, үйінді массасының таужыныстарының тотығу және өзін-өзі қыздыру процестерін сандық бағалау, үйінді жыныстарының беріктік қасиеттерін төмендету және үйінді жақта-рының орнықтылық қорының коэффициенті алынған. Зерттеулер нәтижелері кен мен таужыныстардың өздігінен қызуын болдырмау жөніндегі алдын алу шараларының сыртқы таужыныс үйіндісінің орнықтылығын арттыруға оң әсерінің сандық моделінде ұсынылған. Антипирогендермен қоқыс массасын өңдеуге, олардың өткізгіштігін төмендету үшін қабаттарды тығыздауға және үйінді деңгейлері арасында экрандау қабатта-рын құруға ерекше назар аударылады. Модельдеу нәтижелеріне сүйене отырып, «Дальнезападный» карьерінің жағдайы үшін сыртқы таужыныстың үйіндісін қалыптастырудың оңтайлы технологиясы қарастырылды.

Кілт сөздер: карьер, сыртқы жыныс үйіндісі, сульфидті кен, тотығу, өзін-өзі қыздыру, өткізгіштік, антипиро-ген, тұрақтылық, экрандау қабаты.

Safe Technology of External Dumping During Open-pit Mining of Sulfide Ore Deposits¹**GABAJDULLIN Ravgat**, Cand. of Tech. Sci., Deputy Director, gabaydullin_r@mail.ru,²***ALZHANOV Rustem**, Executive Director, Alrus1983@mail.ru,¹«Scientific-engineering Center «Geomark» LLP, Kazakhstan, Karaganda, Tereshkova Street, 18/2,²«Bastau Expert» LLP, Kazakhstan, Karaganda, Bukhar-Zhyrau Avenue, 51/4,

*corresponding author.

Abstract. The article investigates the problems of optimal technology of external dumping during the open-pit development of fire-hazardous sulfide ores of the Dalnezapadny quarry of the Zhairam deposit. The dump of self-igniting ores and host rocks not only becomes an environmental problem, but eventually loses its stability. The occurrence of spontaneous combustion foci inside the dump can lead to explosive consequences. To study these dangerous phenomena, the article presents the results of numerical modeling, quantitative estimates of the processes of oxidation and self-heating of dump mass rocks, reduction of the strength properties of dump rocks and the coefficient of stability of the sides of the dump are obtained. The results of studies on a numerical model of the positive effect of preventive measures to prevent self-heating of ores and rocks on increasing the stability of the external rock dump are presented. Special attention is paid to the treatment of dump masses with anti-pyrogens, compaction of layers to reduce their permeability and the creation of shielding layers between the tiers of the dump. Based on the simulation results, the processes of optimal technology for the formation of an external rock dump for the conditions of the Dalnezapadny quarry are considered.

Keywords: quarry, external rock dump, sulfide ore, oxidation, self-heating, permeability, anti-pyrogen, stability, shielding layer.

REFERENCES

1. Gabajdullin R.I., Nurgalieva A.D., Rahimberlina A.A. i dr. Pozharoopasnost' Orlovskogo mestorozhdeniya. Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Integraciya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnova realizacii plana natsii» (Saginovskie chteniya no. 7). CH. 2; Karagandinskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. Karaganda: Publ. KarGTU, 2015. pp. 187-189.
2. Hodzhaev R.R., Gabajdullin R.I., Sharipov N.H. i dr. K voprosu ob ekologicheskikh aspektah dobychi sul'fidnyh rud podzemnym sposobom. III Ural'skij mezhdunarodnyj ekologicheskij kongress «Ekologicheskaya bezopasnost' promyshlennyh regionov». Ekaterinburg: SOO OO – MANEB, Institut ekonomiki UrO RAN, UGGU, 2015. pp. 152-156.
3. Aliev S.B., Zaharov V.N., Kenzhin B.M. i dr. Energeticheskaya model' samovozgoraniya ugleporodnyh otvalov. Ugol'. Moscow, 2018. Vyp. 12. pp. 86-91.
4. Kachurin N.M., Stas' G.V., Levin A.D. i dr. Aerodinamika porodnyh otvalov ugol'nyh shaht // Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle. Tula, 2016. No. 1. pp. 3-23.
5. Sultanalieva R.M., Konushbaeva A.T., Turdubaeva CH.E. Issledovaniya vliyaniya temperatury na rabotu razrusheniya krepkih gornyh porod / Kyrgyzskij GTU im. I. Ruzakova // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh nauk. Bishkek, 2019, no. 11. pp. 101-104.
6. Lipatov I.V. Vliyanie teplovyh udarov na prochnostnye svoystva gornyh porod // Doklady AN VSH RF. Novosibirsk, 2020, no. 4 (49). pp. 32-40.