

ФОРМИРОВАНИЕ ШАХТНЫХ ВОД И АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИХ ОЧИСТКИ

А.А. Куликова¹, Ю.А. Сергеева², Т.И. Овчинникова¹, Е.И. Хабарова^{3,1}

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: alexaza@mail.ru

² АО «СУЭК», Россия

³ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Аннотация: Рассмотрен вопрос формирования состава шахтных водопритоков, приведены способы очистки шахтных вод. В зависимости от гидрологических, горно-геологических и горнотехнических факторов, а также глубины залегания полезных ископаемых состав шахтных вод имеет различный химический состав. Формирование шахтных вод на верхних горизонтах происходит под влиянием окислительных процессов, а для нижних горизонтов более характерны восстановительные процессы. С увеличением глубины гидро-карбонатные воды переходят в гидрокарбонатно-сульфатные и сульфатно-гидрокарбонатные. Выделены основные загрязняющие вещества шахтных вод, рассмотрены различные способы очистки шахтных вод, отмечены характерные признаки применения способов очистки шахтных вод и приведены достоинства и недостатки методов. На примере шахты «Шахта им. С.М. Кирова» рассмотрен состав очистных сооружений. В результате анализа выявлено, что аппараты, входящие в технологическую схему, хорошо очищают воду от взвешенных веществ различной крупности, частично от ионов железа (при переходе его окисления в нерастворимую форму). Но ряд тяжелых металлов остается в шахтных водах. Об этом можно судить по наличию фоновых концентраций на местах сброса шахтных вод в р. Иня. В воде р. Иня наблюдаются превышения ПДК по таким загрязняющим веществам, как железо общее, марганец, медь, нитрит-ион и др. Приведены методы и оборудование очистных сооружений, применяемых на угольных предприятиях Кузбасса. Для очистки шахтных вод наблюдается широкий спектр способов, но применяемые технологии в основном сводятся к механической очистке, позволяющей эффективно удалить взвешенные вещества, нефтепродукты, бактериальные загрязнения, частично железо. В соответствии с требованиями к качеству очистки шахтных вод предприятиям необходимо модернизировать очистные сооружения и внедрять новые и эффективные технологии, т.е. решать проблему очистки шахтных вод комплексно, а также предусматривать возможность использования очищенных шахтных вод и образующихся осадков.

Ключевые слова: шахтные воды, взвешенные вещества, агрессивность шахтных вод, методы очистки шахтных вод, качество очистки вод, гидрогеология, горно-геологические и горнотехнические условия.

Для цитирования: Куликова А.А., Сергеева Ю.А., Овчинникова Т.И., Хабарова Е.И. Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №7. – С.135–145. DOI:10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.

Formation of mine water composition and analysis of treatment methods

A.A. Kulikova¹, Yu.A. Sergeeva², T.I. Ovchinnikova¹, E.I. Khabarova^{3,1}

¹ National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: alexaza@mail.ru

² SUEK JSC, Russia

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract: Formation of mine water inflow compositions is discussed, and the methods of mine water treatment are described. Mine water has different chemistry depending on hydrological, geological and geotechnical factors, as well as on depth of mining. Formation of mine water on higher horizons takes place under the influence of oxidation processes, while reduction processes are typical of lower levels. With an increasing depth, hydrocarbonate water changes into carbonate-sulfate and sulfate-hydrocarbonate water. The main pollutants of mine water are identified, the methods of mine water treatment are reviewed, the criteria of application of mine water treatment methods are specified, and the advantages and disadvantages of the methods are described. In terms of the Kirov Mine, the structure of mine water treatment facilities is considered. It is found that equipment included in the process flow chart ensure good removal of various size suspended solids from water and partially remove iron ions (when its oxidation goes to an insoluble form). However, some heavy metals remain in mine water. This fact is proved by the background concentrations observed in the places of mine water discharge in the Inya river. In the Inya water river, some contaminants exceed MAC, namely, total iron, manganese, copper, ion nitrite, etc. The authors describe the treatment methods and equipment used in coal mines in Kuzbass. There is a wide range of mine water treatment methods, but the technologies in application mainly reduce to mechanical purification which enables efficient removal of suspended solids, oil products, bacterial pollution and, partly, iron. In compliance with the requirements to mine water treatment quality, mines should modernize treatment facilities and introduce new advanced technologies, i.e. provide an integrated solution of the mine water treatment problem, and should anticipate usability of treated mine water and dregs.

Key words: mine water, suspended solids, mine water aggressiveness, mine water treatment methods, water treatment quality, hydrogeology, geological and geotechnical conditions.

For citation: Kulikova A.A., Sergeeva Yu.A., Ovchinnikova T.I., Khabarova E.I. Formation of mine water composition and analysis of treatment methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(7):135-145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-135-145.

Введение

Шахтные, рудничные, карьерные и дренажные воды выдаются на дневную поверхность при добыче подземных ископаемых. Формирование водопри-токов напрямую зависит от гидрогеологии, горно-геологических (мощности и угла падения пластов, прочностных характеристик пластов и вмещающих пород, в том числе их состава) и горно-технических факторов (системы разработки месторождения). Шахтные воды принято подразделять по физико-химическому составу на кислотные, минерализованные и загрязненные взвешенными частицами угля и породы. Ионы железа, алюминия, кремния, кальция, магния, хлора, цинка, меди, SO_4^{2-} , HCO_3^- , H^+ , бактерии содержатся в различных соотношениях [1]. Скорость течения воды по выработкам, застаивание в вы-

работках, а также глубина горизонтов влияют на агрессивность шахтных вод, которая оценивается концентрацией водородных ионов (рН). К наиболее агрессивным относятся кислотные воды, образующиеся при значительном содержании в пластах серного колчедана FeS_2 [2]. Проведенными исследованиями установлено, что кислотные воды присутствуют на шахтах, разрабатывающих наклонные пласты угля.

Окислительно-восстановительные процессы при формировании шахтных вод

На верхних горизонтах формирование шахтных вод происходит под влиянием окислительных процессов. Сульфаты закиси железа и свободная серная кислота образуются при соприкосновении пирита с водой под воздействием воздуха и

растворенного в воде кислорода. Далее двухвалентное железо окисляется до трехвалентного. Образование в коллоидном растворе основных солей в результате гидролиза сульфата трехвалентного железа в слабокислых растворах придает кислотным водам характерный желто-коричневый цвет.

Восстановительные процессы, при которых осуществляется обмен ионов кальция воды на ионы натрия пород, наиболее характерны для нижних горизонтов. Формированию щелочных вод гидрокарбонатно-натриевого типа способствуют присутствующие десульферирующие бактерии. Таким образом, гидрокарбонатные воды переходят в гидрокарбонатно-сульфатные и сульфатно-гидрокарбонатные с увеличением глубины. В засушливых районах минерализация грунтовых вод повышается [3].

Анализ загрязненности шахтных вод

Качественный состав шахтных вод существенно изменяется по угольным бассейнам, месторождениям и районам [4, 5]. Нарушение экологического равновесия в угольных бассейнах происходит в результате сброса в наземную гидрографическую сеть шахтных вод (может поступать до 10 м³ шахтных вод на тонну добытого угля). Результатами сброса являются заиливание, засоление и закисление водоемов и водотоков.

Увеличение объемов добычи, увеличение нагрузки на очистной забой, переход на более глубокие горизонты, усложнение гидрогеологических условий приводят к увеличению объемов шахтных вод [6–8], их загрязненности различными веществами, вследствие чего происходит истощение подземных водоносных горизонтов, в том числе насыщенных чистой питьевой водой.

По химическому составу подземные воды угольных бассейнов похожие [9].

Для шахтных вод характерна повышенная природная минерализация (в некоторых случаях свыше 20 г/л).

Исследованиями установлено, что к загрязнениям относятся взвешенные вещества, органические загрязнения, тяжелые металлы и бактерии. Содержание взвешенных веществ (угольных и породных частиц) в сточных водах угольных шахт составляет от 100 мг/л до 2600 мг/л. Зольность взвеси изменяется от 20 до 80%. Стоит отметить, что зольность взвеси увеличивается с уменьшением размеров частиц. Органические загрязнения в виде частиц чистого угля, продуктов жизнедеятельности живых организмов и разложения древесины, а также масел, применяемых в горном оборудовании, находятся в растворенном и взвешенном состояниях [10]. Около 77% шахтных вод загрязнены нефтепродуктами, содержание которых изменяется от 0 до 55 мг/л. Шахтные воды Кузбасса имеют высокое содержание тяжелых металлов: железа, меди, марганца и цинка.

Несмотря на строительство и модернизацию действующих очистных сооружений на горнодобывающих предприятиях, качество очищенных вод по многим показателям не соответствует требуемым нормативам [11].

Приведем систематизированные результаты анализа способов очистки шахтных вод (таблица).

Очистка шахтных вод на горнодобывающих предприятиях Кузбасса

В качестве примера приведем основные мероприятия, применяемые для очистки шахтных вод центрального водоотлива АО «СУЭК-Кузбасс» «Шахта им. С.М. Кирова». Технологическая схема очистки представлена на рисунке.

Сточные воды предварительно очищаются от грубодисперсных примесей

Способы очистки шахтных вод
Methods for purification of mine water

Способ очистки	Возможности	Достоинства	Недостатки
Пруд-осветлитель или отстойник	Очистка от взвешенных веществ с содержанием частиц менее 0,1 мм/с, не более 50 мг/л; отстаивание 10 суток и более; объем первого каскада рассчитан на 5-летний объем уплотненного осадка; эффективность осветления 50 – 62% [12]	Бывают одно-, двух- и многокаскадные; рельеф местности (овраги, отработанные карьеры и др.) с подтопкой дна прудов (глиняные замки, пленка и др.) позволяет сформировать пруд	Использование больших площадей земли; неуправляемость процесса осветления
Фильтрующие дамбы	Очистка от взвешенных веществ (200 – 300 мг/дм ³), нефтепродуктов, фенолов и хлоридов до значений ПДК	Простая конструкция; размещение в естественных или искусственных выемках; обрабатывается бактериальным штаммом	Необходимость выдерживания сточной воды в дамбе не менее 3 суток для образования биопленки; проведение мониторинга.
Геохимический барьер (механические плотины, карбонатные и др.) [13]	Очистка от взвешенных веществ; очистка от тяжелых металлов; снижение минерализации	Обустройство барьеров в естественных и искусственных выемках; простая конструкция; образование новых минералов	Недостаточная изученность; наращиваемая дамба обвалования
Нейтрализация	Улавливание тяжелых металлов; нейтрализация кислых стоков	Эффективность очистки 99%	Высокоминерализованные сульфатные воды способствуют образованию гипса; концентрация взвешенных веществ не более 5 мг/л во избежание заиливания фильтра
Осаждение	Ионы тяжелых металлов переводятся в труднорастворимые вещества (сульфиды, карбонаты и гидроксиды)	Недорогой способ за счет повсеместно распространенных карбонатных минералов кальция и магния, а также их производных	Безвозвратная потеря ценных металлов; необходимость устройства усреднителей; регулирование дозы реагента по pH; необходимость организации реактуемых шламы; использование флокулянтов

Окисление	Улавливание ионов Fe^{2+} и Mn^{2+}	Если железо и марганец находятся в устойчивой форме, то можно окислять кислородом воздуха	Органические примеси способствуют образованию растворимых комплексных соединений; использование сильных окислителей
Восстановление	Удаление из сточных вод соединений ртути, хрома, мышьяка	Получение элементарных элементов	Сложность проведения операций
Коагуляция	Удаление из воды мелкодисперсных частиц (менее 1 мкм) неорганического, органического происхождения	В качестве коагулянтов обычно добавляют растворы сульфата алюминия или трехвалентного железа	Образуются не крупные хлопья; осадки плохо отстают воду
Коагуляция + флокуляция	Удаление из воды мелкодисперсных частиц (менее 1 мкм) неорганического, органического происхождения	Получение больших агрегатов; хорошее отстаивание; образование плотных осадков; уменьшение количества коагулянтов	Важна последовательность введения коагулянта и флокулянта
Флотация	Удаление из сточных вод ВВ, СПАВ, нефтепродуктов, жиров, масел, смол; при использовании ионной флотации можно удалить медь, цинк, кобальт, никель, железо и другие тяжелые металлы	Удаление мелкодисперсных веществ и нефтепродуктов при использовании реагентов; флотация на открытом воздухе	Необходимость использования аэраторов; экологически безопасных реагентов, используемых в качестве собирателей
Ионный обмен	Концентрация до $2-3$ г/л; удаление цветных и тяжелых металлов, минеральных солей, органических соединений неорганических веществ	Хорошие результаты очистки от минеральных солей	Необходимость регенерации; необходимость проведения очистки в теплых помещениях
Экстракция	Ценные органические вещества (например, фенолы и жирные кислоты), а также тяжелые цветные металлы (медь, никель, цинка, кадмия, ртути и др.)	Использование при концентрации 2 г/л и более. Эффективность очистки 92–97%	Требует регенерации экстрагента; не очищает до норм ПДК
Сорбция	Удаление ароматических соединений, слабых электролитов, неэлектролитов, красителей, ценных компонентов	Очистка до ПДК; адсорбенты, алюмосиликатные и магнийсодержащие материалы позволяют удалять тяжелые металлы; использование техногенных отходов	Дорогая регенерация сорбентов; высокая стоимость и низкая избирательность сорбентов по отношению к конкретному компоненту раствора

Обратный осмос	Концентрация солей в воде 2,5–10 г/л, может работать и более 10 г/л	Удаляет растворимые органические и неорганические вещества, микроорганизмы	Затраты на предварительную очистку вод от веществ, отравляющих мембраны и способствующих их засорению и обрастанию, концентрация веществ не более 3 мг/л
Электродиализ	При содержании солей в воде 2,5–10 г/л	Позволяет удалить тяжелые металлы	Содержание не более: взвешенных веществ — 1,5 мг/л; железа — 0,05 мг/л; марганца — 0,05 мг/л; брома — 0,4 мг/л
Анодное окисление и катодное восстановление	Очистка от растворенных примесей (цианидов, роданидов, сульфидов, меркаптанов и др.), при восстановлении очистка от ионов тяжелых металлов Pb^{2+} , Sn^{2+} , Hg^{2+} , Cu^{2+} , As^{5+} , Cr^{6+}	Осаждение ионов происходит в виде нерастворимых сульфидов или бисульфидов, которые удаляют механически; позволяет очистить почти на 100%	При концентрации загрязняющего вещества 1 г/л необходимо добавлять хлорид натрия
Электрокоагуляция	Содержание веществ не более 100 мг/л, нефтепродуктов не более 250 мг/л; эффективность очистки от нефтепродуктов и масел 54–68%, от жиров 92–99%, взвешенных веществ — 97,4%; при солесодержании менее 0,3 г/л добавляют NaCl; эффективность очистки от Cr^{6+} 90–95%, pH среды 3–6	Растворение 1 г алюминия эквивалентно 6,33 г $Al_2(SO_4)_3$; растворение 1 г железа эквивалентно 2,9 г $FeCl_3$ и 3,58 г $Fe_2(SO_4)_3$	Большой расход электроэнергии
Гальванокоагуляция	Удаление ионов тяжелых и цветных металлов; простых и комплексных цианидов; органических веществ, минеральных и органических жиров, ПАВ; жидких радиоактивных отходов; минеральных и органических мелкодисперсных взвешенных веществ	Экономичен, имеет низкую удельную энергоёмкость	Большие габариты, энергопотребление; невозможность регулирования параметров процесса, необходимость перемишивания элементов гальванопар, чтобы не происходила цементация
Биологическая очистка (аэротенки, биофильтры, биологические пруды, биореакторы) [14]	Очистка от растворенных органических и некоторых неорганических (сероводорода, сульфидов, аммиака, нитритов и др.) веществ; очистка от тяжелых металлов	Низкий расход энергии; нет вторичного загрязнения воды; невысокие эксплуатационные расходы; обеспечение жестких нормативов сброса	Нет опыта очистки шахтных вод; микроорганизмы погибают при определенной концентрации тяжелых металлов в среде



Технологическая схема очистки шахтных вод
Technological scheme of mine water treatment

с помощью автоматического фильтра с обратной промывкой.

Для увеличения эффективности работы флотационной установки предусмотрена автоматическая станция дозирования реагентов. Реагенты дозируются в строго необходимых для технологического процесса концентрациях. Для наилучшего перемешивания реагентов со сточной водой используются трубчатые флокуляторы. Флотационная установка ЕС Flomar® HL предназначена для отделения образовавшихся хлопьев. Сточная вода под давлением насыщается воздухом, далее при разряжении загрязняющие вещества всплывают вместе с пузырьками воздуха. Образовавшийся флотошлам направляется на обезвоживание, а очищенная вода — на доочистку. Доочистка от мелкодисперсных примесей осуществляется на дисковых фильтрах ЕС RCF. Очистка фильтров осуществляется автоматически. Обезвоживание флотошлама происходит на ка-

мерном фильтр-прессе, фильтрат направляется на повторную очистку. Обслуживание очистных сооружений осуществляется через персональный компьютер, где отображается весь технологический процесс.

Анализ эффективности технологической схемы показал, что, несмотря на очистку от взвешенных веществ различной крупности и от нефтепродуктов, частично от ионов железа, при переходе его окисления в нерастворимую форму, ряд тяжелых металлов остается, о чем свидетельствуют фоновые концентрации на местах сброса шахтных вод в р. Иня. В воде р. Иня присутствуют следующие загрязнители: железо общее, марганец, медь, концентрации которых значительно превышают ПДК.

В процессе исследований были изучены и другие внедренные и уже используемые на угольных предприятиях Кузбасса (шахты «Заречная», «Алардинская», «Осинниковская», разрез

«Виноградовский» ОАО «КТК», Талдинский угольный разрез ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» и др.) очистные сооружения, способы очистки шахтных вод.

Таким образом, можно сделать вывод, что традиционная очистка шахтных вод на горнодобывающих предприятиях Кузбасса осуществляется методами механической очистки (отстаивание в отстойниках или прудах-накопителях, иногда фильтрование части стока и его обеззараживание). В настоящее время эффективность очистки в отстойниках от взвешенных веществ составляет 60%, а в комплексе с насосно-фильтровальными станциями — 90%. Однако используемые сооружения механической очистки не позволяют эффективно очищать воду от нефтепродуктов, соединений железа, минеральных солей и других загрязнений, свойственных шахтным водам Кузбасса.

Стоит отметить, что применяемые технологии механической очистки шахтных вод могут обеспечить только эффективное удаление взвешенных веществ и бактериальных загрязнений. Новые требования к качеству очистки подталкивают предприятия к дальнейшей модернизации очистных сооружений и внедрению новых технологий. На фоне процесса развития экологического законодательства, сопровождающегося давлением общественного мнения, неизбежно введение в эксплуатацию дорогостоящих очистных сооружений, возможности которых намного превышают реальные потребности [15, 16]. В этих условиях необходима разработка рекомендаций по рациональному планиро-

ванию развития и внедрения инженерных мер защиты окружающей среды на горных предприятиях, что позволило бы обеспечить необходимое качество очистки шахтных вод (в соответствии с нормативными требованиями, установленными в РФ) и избежать чрезмерных материальных и финансовых затрат.

Заключение

Формирование состава шахтных водопритоков в основном зависит от гидрологических, горно-геологических и горнотехнических факторов. В зависимости от глубины залегания полезных ископаемых состав шахтных вод имеет различный химический состав. Для очистки шахтных вод наблюдается широкий спектр способов, но применяемые технологии в основном сводятся к механической очистке.

Анализ эффективности применяемых способов очистки шахтных вод показал, что подавляющая часть имеющихся на угольных предприятиях очистных сооружений не обеспечивает очистку шахтных вод до нормативных требований от нефтепродуктов, соединений железа, минеральных солей и других загрязнений из-за несовершенства применяемых схем очистки.

В соответствии с требованиями к качеству очистки шахтных вод предприятиям необходимо модернизировать очистные сооружения и внедрять новые и эффективные технологии, т.е. решать проблему очистки шахтных вод комплексно, а также предусматривать возможность использования очищенных шахтных вод и образующихся осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gavrishin A. I.* Formation patterns of the chemical composition of mine waters in Eastern Donbas // *Doklady Earth Sciences*. 2018. Vol. 481. No 1. Pp. 916 – 917.
2. *Kulikova E. Yu.* Estimation of factors of aggressive influence and corrosion wear of underground structures // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931. Pp. 385 – 390. DOI: 10.4028/www.scientific.net / MSF.931.385.

3. *Runtti H., Tolonen E. T., Tuomikoski S., Lassi U., Luukkonen T.* How to tackle the stringent sulfate removal requirements in mine water treatment – A review of potential methods // *Environmental Research*. 2018. Vol. 167. Pp. 207 – 222. DOI: 10.1016/j.envres.2018.07.018.

4. *Павленко М. В., Скопинцева О. В.* О роли капиллярных сил при вибровоздействии на гидравлически обработанный газонасыщенный угольный массив // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 3. – С. 43 – 50. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-43-50.

5. *Arefieva O. D., Shapkin N. P., Gruschakova N. V., Prokuda N. A.* Mine water: chemical composition and treatment // *Water Practice and Technology*. 2016. Vol. 11. No 3. Pp. 540 – 546.

6. *Пелипенко М. В., Баловцев С. В., Айнбиндер И. И.* К вопросу комплексной оценки рисков аварий на рудниках // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2019. – № 11. – С. 180–192. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-180-192.

7. *Баловцев С. В., Шевчук Р. В.* Геомеханический мониторинг шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2018. – № 8. – С. 77 – 83. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-77-83.

8. *Баловцев С. В.* Оценка аэрологического риска аварий на выемочных участках угольных шахт, опасных по взрывам газа и пыли // *Горный журнал*. – 2015. – № 5. – С. 91 – 93. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.19.

9. *Войтович С. П.* Геохимические особенности шахтных вод угольных бассейнов Украины и России // *Молодой ученый*. – 2015. – № 23. – С. 395 – 397.

10. *Лебедев В. С., Скопинцева О. В.* Остаточные газовые компоненты угольных пластов: состав, содержание, потенциальная опасность // *Горный журнал*. – 2017. – № 4. – С. 84 – 86. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.17.

11. *Gubina N. A., Ylesin M. A., Karmanovskaya N. V.* Ways to increase the productivity and quality of mine water treatment // *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2018. Vol. 9. No 3. Pp. 423 – 427. DOI: 10.14505/jemt.v9.3(27).03.

12. *Бусарев А. В., Шешегова И. Г., Шарипова К. Г.* К вопросу очистки шахтных стоков / Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения. Материалы VIII Национальной конференции с международным участием. – Саратов, 2018. – С. 74 – 78.

13. *Бардамова И. В.* Изучение свойств геохимического барьера на основе известняка / Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: труды VII Всерос. симп. с международным участием и XIV Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана. – Чита, 2018. – С. 217 – 222.

14. *Palihakkara C. R., Dassanayake S., Jayawardena C., Senanayake I. P.* Floating wetland treatment of acid mine drainage using eichhornia crassipes (water hyacinth) // *Journal of Health and Pollution*. 2018. Vol. 8. No 17. Pp. 14 – 19.

15. *Бегак М. В., Гусева Т. В.* О применении наилучших доступных технологий в очистке сточных вод в Европейском Союзе // *Чистая вода: проблемы и решения*. – 2011. – № 1 – 2. – С. 50 – 54.

16. *Ефимов В. И., Корчагина Т. В., Свинарченко С. А., Рябов Г. Г.* Способ очистки шахтных вод // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. – 2018. – № 3. – С. 36 – 42. **ПЛАЭ**

REFERENCES

1. Gavrishin A. I. Formation patterns of the chemical composition of mine waters in Eastern Donbas. *Doklady Earth Sciences*. 2018. Vol. 481. No 1. Pp. 916 – 917.

2. Kulikova E. Yu. Estimation of factors of aggressive influence and corrosion wear of underground structures. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931. Pp. 385 – 390. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.385.

3. Runtti H., Tolonen E. T., Tuomikoski S., Lassi U., Luukkonen T. How to tackle the stringent sulfate removal requirements in mine water treatment – A review of potential methods. *Environmental Research*. 2018. Vol. 167. Pp. 207 – 222. DOI: 10.1016/j.envres.2018.07.018.
4. Pavlenko M. V., Skopintseva O. V. Role of capillary forces in vibratory action on hydraulically treated gas-saturated coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;3:43-50. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-43-50.
5. Arefieva O. D., Shapkin N. P., Gruschakova N. V., Prokuda N. A. Mine water: chemical composition and treatment. *Water Practice and Technology*. 2016. Vol. 11. No 3. Pp. 540 – 546.
6. Pelipenko M. V., Balovtsev S. V., Aynbinder I. I. Integrated accident risk assessment in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(11):180-192. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-180-192.
7. Balovtsev S. V., Shevchuk R. V. Geomechanical monitoring of mine shafts in difficult ground conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 8, pp. 77–83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-8-0-77-83.
8. Balovtsev S. V. Aerological risk assessment in working areas of gas and dust explosion-hazardous coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no 5, pp. 91 – 93. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.19.
9. Voytovich S. P. Geochemical features of mine water in the coal basins of Ukraine and Russia. *Molodoy uchenyy*. 2015, no 23, pp. 395 – 397. [In Russ].
10. Lebedev V. S., Skopintseva O. V. Residual coalbed gas components: composition, content, hazard. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no 4, pp. 84 – 86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.04.17.
11. Gubina N. A., Ylesin M. A., Karmanovskaya N. V. Ways to increase the productivity and quality of mine water treatment. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2018. Vol. 9. No 3. Pp. 423 – 427. DOI: 10.14505/jemt.v9.3(27).03.
12. Busarev A. V., Sheshegova I. G., Sharipova K. G. On the issue of mine drainage treatment. *Problemy i perspektivy razvitiya stroitel'stva, teplogazosnabzheniya i energoobespecheniya. Materialy VIII Natsional'noy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Problems and prospects for the development of construction, heat and gas supply and energy supply Materials of the VIII National Conference with international participation], Saratov, 2018, pp. 74 – 78. [In Russ].
13. Bardamova I. V. Studying the properties of the geochemical barrier based on limestone. *Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnykh territoriy. Ratsional'noe prirodopol'zovanie. Sovremennoe mineraloobrazovanie: trudy VII Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i XIV Vserossiyskikh chteniy pamyati akad. A. E. Fersmana* [Mineralogy and geochemistry of the landscape of mining territories. Rational nature management. Modern mineral formation. Proceedings of the VII all-Russian Symposium with international participation and the XIV all-Russian readings in memory of A. E. Fersman], Chita, 2018, pp. 217 – 222. [In Russ].
14. Palihakkara C. R., Dassanayake S., Jayawardena C., Senanayake I. P. Floating wetland treatment of acid mine drainage using eichhornia crassipes (water hyacinth). *Journal of Health and Pollution*. 2018. Vol. 8. No 17. Pp. 14 – 19.
15. Begak M. V., Guseva T. V. On the application of the best available technologies in wastewater treatment in the European Union. *Pure water: problems and solutions*. 2011, no 1 – 2, pp. 50 – 54. [In Russ].
16. Efimov V. I., Korchagina T. V., Svinarenko S. A., Ryabov G. G. Method of mine water treatment. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2018, no 3, pp. 36 – 42. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Куликова Александра Анатольевна¹ – старший преподаватель, e-mail: alexaza_@mail.ru, Сергеева Юлия Александровна – заместитель начальника Управления ПК, ПБ, ОТ и ООС, начальник отдела охраны окружающей среды АО «СУЭК», e-mail: sergeeva@suek.ru,

Овчинникова Татьяна Игоревна¹ — д-р техн. наук, зав. кафедрой,
e-mail: ovchinnikova_ti@mail.ru,
Хабарова Елена Ивановна¹ — канд. хим. наук, доцент;
доцент, МИРЭА — Российский технологический университет,
e-mail: khabarova@mitht.ru,
¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Куликова А.А., e-mail: alexaza_@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Kulikova¹, Senior Lecturer, e-mail: alexaza_@mail.ru,
Yu.A. Sergeeva, Deputy Head of Department of PC,
Safety, Health and Environmental Protection,
Head of Environmental Protection Department,
SUEK JSC, Russia, e-mail: sergeevaya@suek.ru,
T.I. Ovchinnikova¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Chair, e-mail: ovchinnikova_ti@mail.ru,
E.I. Khabarova¹, Cand. Sci. (Chem.), Assistant Professor;
Assistant Professor, MIREA — Russian Technological University,
Moscow, Russia, e-mail: khabarova@mitht.ru,
¹ National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.A. Kulikova, e-mail: alexaza_@mail.ru.

Получена редакцией 11.03.2020; получена после рецензии 07.04.2020; принята к печати 20.06.2020.
Received by the editors 11.03.2020; received after the review 07.04.2020; accepted for printing 20.06.2020.



РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЕ РУДОПОДГОТОВКИ

(№ 1221/07–20 от 06.05.2020; 9 с.)

Бабокин Геннадий Иванович¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: babokinginov@yandex.ru,
Дубоносов Сергей Викторович¹ — студент,
¹ НИТУ «МИСиС».

Исследованы энергетические характеристики мельницы мокрого полусамоизмельчения. Установлено влияние параметров режима работы мельницы на ее полезную мощность и получены зависимости потребляемой мощности от степени загрузки барабана, плотности загрузки и относительной частоты вращения барабана мельницы. Предложено применение безредукторного привода пластинчатого питателя ПП2 на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами, обеспечивающего повышение энергоэффективности его работы.

Ключевые слова: мельница, энергоэффективность, энергетические характеристики, полезная мощность, пластинчатый питатель, синхронный электродвигатель с постоянными магнитами.

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF A BALL MILL IN TECHNOLOGICAL SCHEME OF ORE PREPARATION

G.I. Babokin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: babokinginov@yandex.ru,
S.V. Dubonosov¹, Student,

¹ National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

The energy characteristics of a wet semi-self-grinding mill are investigated. The influence of the mill operating mode parameters on its useful power is established and the power consumption depends on the degree of loading of the drum, the loading density and the relative speed of rotation of the mill drum. The application of a direct drive of a plate feeder based on a synchronous motor with permanent magnets, which provides an increase in the energy efficiency of its operation, is proposed.

Key words: mill, energy efficiency, energy characteristics, useful power, plate feeder, permanent magnet synchronous motor.