

Комплексный подход к повышению эффективности утилизации избыточных рассолов на калийных горнодобывающих предприятиях

Павел Сергеевич ЩЕРБАНЬ^{1*}
Александр Олегович ГАПЧИЧ^{2**}
Алексей Владимирович ЖДАНОВ^{3***}
Ольга Николаевна ЛЕТУНОВСКАЯ^{4****}

¹Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград, Россия

²Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

³Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

⁴Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Цель. В работе анализируются положительные и отрицательные стороны различных технологических решений по использованию жидких рассолов в ходе разработки полиминеральных месторождений, рассматривается проблема определения выбора оптимального подхода с учетом геологических, технических, экологических и финансовых факторов.

Методы. Исследование вопросов утилизации и сокращения жидкостной составляющей сбросов при производстве калийных удобрений, снижение потерь ценных компонентов с жидкими сбросами и за счет этого увеличение объема производства калийных удобрений, а также использование в технологии шахтных рассолов является актуальной и важной научной и технической задачей калийной отрасли. Технологически возможны несколько альтернативных решений снижения числа размещаемых в шламохранилищах жидких побочных продуктов. В работе использовался комплекс аналитических методов, включающих статистическую обработку данных, моделирование, предпроектные проработки технологических решений, оценку экономических затрат.

Результаты. Избыточные рассолы калийных предприятий являются жидкими отходами, получаемыми при производстве калийных удобрений – MOP и SOP. Накопление избыточных рассолов в шламохранилищах исчисляется миллионами кубических метров в год. Расширение площади шламохранилищ и наращивание дамб является лишь временным решением и сопряжено с рисками при проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений, повышающими риски утечки рассолов в открытые и подземные водные бассейны. Это обуславливает необходимость применения иных методов утилизации рассолов. В зависимости от характера обрабатываемых полиминеральных руд для утилизации избыточных рассолов могут использоваться комбинированно сразу несколько методов – обратная закладка, осмос, закачка в глубинные горизонты, многокорпусное выпаривание.

Выводы. Для предприятий, перерабатывающих калийно-магниевое сырье, наиболее оптимальным сочетанием технологий является следующее: 60 % утилизируются путем использования вакуум-выпарных установок, 20 % – при помощи закачки избыточных рассолов, 10–20 % приходится на технологии обратной закладки или получение дополнительной продукции.

Ключевые слова: геоэкология полиминерального сырья, рациональное использование недр, избыточные рассолы, когенерация, обогащение калийных руд, обратная закладка.

Введение

Среди основных промышленных методов утилизации избыточных рассолов можно выделить следующие: вакуум-выпаривание рассолов с последующей кристаллизацией солей, закачка в глубокие поглощающие горизонты (УЗИР), закладка в отработанное пространство рудника (гидрозакладка, литая твердеющая закладка) [1, 2]. Также в отдельных случаях применимы обратный осмос и термогидролиз бишофитового щелока с получением оксида магния и соляной кислоты. Кратко раскроем содержа-

ние основных технологий, решающих вопрос размещения побочных продуктов калийных производств.

Так, выпаривание избыточных растворов осуществляется в многокорпусной выпарной установке. Выпарные аппараты состоят из греющей камеры, по центру которой расположена труба вскипания и сепаратора, в котором растворный пар отделяется от кипящего раствора [3]. Циркуляция упариваемого раствора по трубкам греющей камеры осуществляется с помощью насоса; греющий пар

✉Ursa-maior@yandex.ru

**gapchich.alexander@gmail.com

***a.zhdanov@k-potash.ru

****ol.let@yandex.ru

поступает в межтрубное пространство. Раствор нагревается в трубках греющей камеры до температуры, превышающей температуру кипения; вскипание раствора происходит в трубе вскипания над греющей камерой. Упариваемый раствор вместе с кристаллизующейся твердой фазой отводится из нижней части сепаратора. Учитывая накопление в рассолохранилищах атмосферных осадков и других производственных факторов, можно сказать, что такие рассолы обладают невысокой температурной депрессией, что обуславливает техническую возможность применения аппаратов ВВУ с тепловым насосом.

В свою очередь, технология обратной закладки представляет собой гидротранспорт или литую твердеющую закладку отходов обогатительной фабрики в отработанное пространство шахты. Таким образом, побочные продукты размещаются в отработанных пустотах рудника, сокращая площади, отчуждаемые для размещения данных объемов на поверхности и уменьшая экологическую нагрузку на зону рядом с производством. Кроме того, в случае использования литой твердеющей закладки (т. е. материала, набирающего прочность, сопоставимую с окружающим выработки горным массивом) возможно повысить извлечение полезных компонентов без значительного нарушения геомеханической стабильности вышележащих пластов [3].

Использование технологии закачивания избыточных рассолов базируется на методике возврата подтоварных нефтяных вод и к настоящему моменту является достаточно отработанным способом. Основные требования – максимальное соответствие химического состава воды исходному составу флюида и соблюдение температурного режима для предотвращения повышенного выпадения солей на оборудование и в призабойную зону скважины. Для калийных предприятий принятие решения по закачке требует достаточно детальной, затратной и длительной по времени проработки – поиск подходящего пласта-коллектора, обоснование закрытости и герметичности резервуара, его защищенности с точки зрения тектонических и иных геологических факторов, изучение емкостных свойств резервуара, пластового давления, проницаемости и эффективной пористости пород, вещественного состава коллектора, его инертности по отношению к закачиваемым рассолам. Обязательным этапом являются натурные испытания на опытных скважинах в течение 1,5–2 лет (анализ влияния сезонных изменений), которые позволяют получить конкретные параметры приемистости скважины и выполнить расчеты комплекса по закачке. Минимальное количество скважин – рабочая, наблюдательная (резервная), мониторинговая [4].

Дополнительной мерой может являться также технология обратного осмоса. Он относится к группе баромембранных технологий. Движущей силой процесса является разница давлений по обе стороны полупроницаемой пористой мембраны. В процессе работы на поверхности и в порах мембраны постепенно накапливается большое количество загрязнений. Этот осадок снижает производительность установки. Восстановить производительность установки можно, проведя цикл регенерации мембран. Несмотря на наличие промышленных установок, обратный осмос не нашел практического применения на калийных предприятиях.

Проблемы оптимизации технологических процессов. Далее проанализируем ряд материалов по методам утилизации избыточных рассолов на предприятиях, обогащающих калийно-магниевого руды на предмет эффективности их применения в утилизации избыточных рассолов.

Эксплуатационные расходы выпарной установки в значительной степени определяются потребляемой энергией. В производственной практике выделяются два основных способа рекуперации энергии: многокорпусное выпаривание и применение тепловых насосов [5].

Многокорпусное выпаривание (МЕЕ). Тепловой баланс однокорпусной выпарной установки показывает, что теплосодержание вторичного пара приблизительно равно количеству теплоты, подводимой с греющей стороны теплообменника. Если вторичный пар под действием первичного источника энергии (пара с котельной) использовать в качестве греющего во втором корпусе аппарата, расход энергии сократится приблизительно на 50 %. Тот же принцип можно использовать и в последующих корпусах и таким образом экономить тепловую энергию. Максимальная температура нагрева в первом корпусе и самая низкая температура кипения в последнем корпусе образуют общую разность температур, которая распределяется по всем корпусам аппарата. Соответственно разность температур в каждом корпусе уменьшается с увеличением числа корпусов. Минимальная разность температур между корпусами ВКУ определяется суммой разницы температур, необходимой для эффективной передачи тепла от греющего пара выпариваемой среде (6–11 °С), и разницы температуры кипения рассола и растворителя (температурной депрессией). За счет распределения общей разности температур между корпусами на несколько корпусов возникает необходимость увеличения греющей поверхности каждого корпуса, чтобы обеспечить требуемую производительность по выпаренной воде при меньшей разности температур. В первом приближении можно считать, что площадь поверхностей теплообмена во всех корпусах растет пропорционально числу корпусов. Следовательно, капитальная стоимость установки увеличивается линейно, в то время как увеличение энергоэффективности при переходе к каждому последующему корпусу растет более медленными темпами. Основным достоинством многокорпусных выпарных аппаратов является многократное использование теплосодержания первичного греющего пара. Однако этим аппаратам свойственны существенные недостатки: высокая стоимость, большие размеры, потребность в больших производственных площадях (рис. 1) [6].

Механическая рекомпрессия пара (МВР). Многократное использование тепла первичного греющего пара может быть достигнуто в однокорпусном аппарате при любой требуемой температуре кипения раствора путем применения механической рекомпрессии пара. Установка для выпаривания с МРП работает по принципу цикла Карно теплового насоса, в котором вторичный пар частично или полностью засасывается пароструйным инжектором или турбокомпрессором и повторно сжимается до уровня заданного давления греющего пара. Далее пар используется для обогрева того же аппарата. Энергия парообразования генерируется вследствие изоэнтальпийного увеличения энтальпии пара. Для подогрева питания (рассола) до

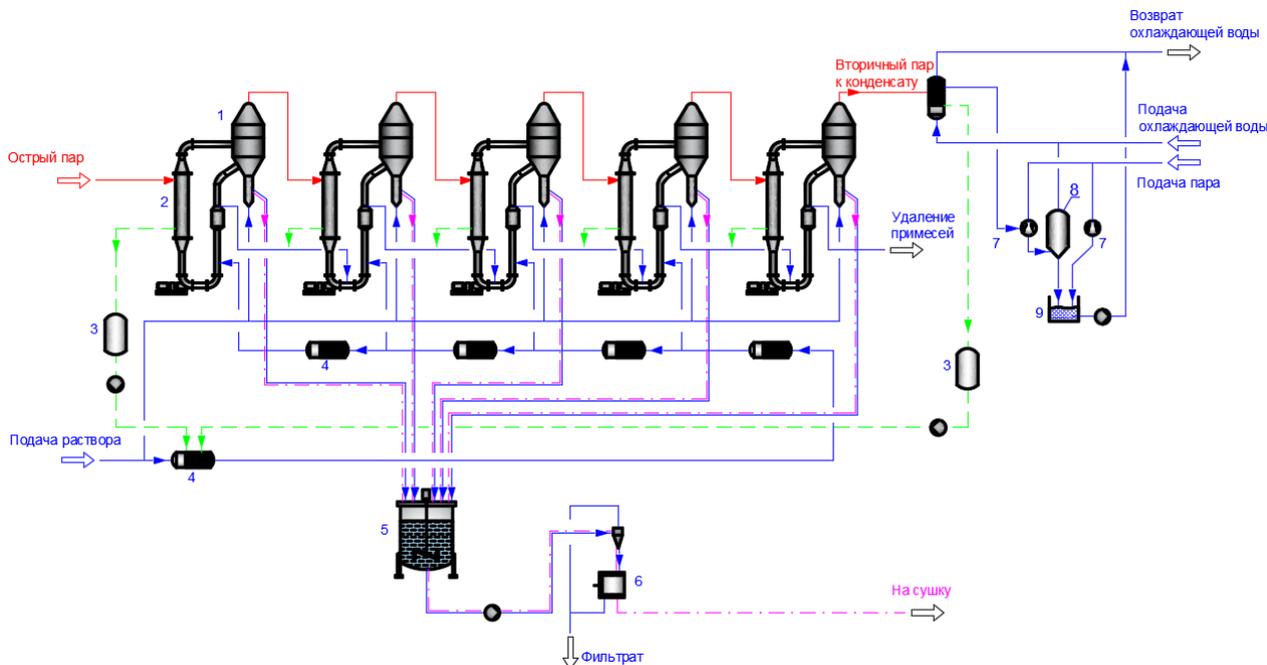


Рисунок 1. Выпаривание в многокорпусной установке: 1 – вакуум-кристаллизационная установка (ВКУ); 2 – теплообменник; 3 – конденсатосборник; 4 – подогреватель; 5 – емкость с мешалкой; 6 – центрифуга; 7 – парозежектор; 8 – конденсатор; 9 – сборник горячего конденсата

Figure 1. Evaporation in a multi-body installation: 1 – vacuum crystallization unit; 2 – heat exchanger; 3 – condensate collector; 4 – heater; 5 – container with agitator; 6 – centrifuge; 7 – steam ejector; 8 – condenser; 9 – hot condensate collector

заданной входящей температуры используется также конденсат вторичного пара. Благодаря такой интенсивной рекуперации тепла потребление дополнительного греющего пара в большинстве случаев не требуется, за исключением паровых эжекторов на последнем корпусе (рис. 2) [7]. Расход пара на парозежекторы незначительный и составляет 2–3 т/ч.

Преимуществом MVR является возможность многократного использования вторичного греющего пара в замкнутом цикле, что позволяет проводить выпаривание в однокорпусной установке, тем самым сокращая металлоемкость установки и эксплуатационные расходы. Тем не менее объем инвестиций на капитальные затраты при установке тепловых насосов возрастает на 20–30 %. Кроме того, значительно возрастает энергопотребление установки ВВУ с МРП. Так, на один компрессор приходится 4,2–6,3 МВт установленной мощности. Практика гринфилд-проектов показывает, что сумма инвестиций на капитальные затраты MVR может быть возвращена в течение 5–6 лет в зависимости от тарифов на электроэнергию в конкретном регионе [8]. В табл. 1 приведен сравнительный анализ потребления энергоресурсов многокорпусной установки и MVR на примере расчета на проектируемом предприятии по утилизации избыточных рассолов мощностью 1 млн м³ в год, расположенном в Пермском крае РФ. Затраты на энергоресурсы в данном регионе оцениваются в размере 1134 руб. за 1 Гкал для нагрева пара, и 2,43 руб./((кВт × ч).

MVR экономит потребление условного топлива, которое можно пересчитать на газ или мазут, для генерации греющего пара примерно в 20 раз, что обуславливает значительное снижение выбросов парникового газа CO₂, тем самым уменьшая потребность в квоте на эмиссию CO₂ в атмосферу. Данный фактор набирает актуальность с каж-

дым годом, учитывая соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата (Парижское соглашение). Важно отметить, что в приведенном расчете OPEX необходимо уточнить тарифы на энергоресурсы в конкретном регионе. Колебания в стоимости производства пара могут отличаться в большую сторону на 10–15 %, в таком случае описанный расчет показывает снижение OPEX для MVR в размере 8–10 млн евро в год, а возврат вложенных инвестиций CAPEX для MVR сокращается до 5 лет. Этот расчет не учитывает удельные затраты на производство охлаждающей воды с градирен, который в 7,6 раза больше при MEE в сравнении с MVR, а также не учитывает затраты на квоты выброса CO₂ в атмосферу [9]. Если учесть данные затраты, то срок возврата инвестиций будет сокращен с 5 до 4 лет.

Для того чтобы сократить закупку электроэнергии, целесообразно рассматривать когенерацию с установкой турбины в котельной. С использованием турбины электроэнергия генерируется как сопутствующий продукт в когенерационном цикле. В результате при общем коэффициенте использования тепла 82–95 % с каждого нормального кубического метра природного газа вырабатывается дополнительная электрическая энергия. В паротурбинных установках ее доля составляет около 28–39 %, в газотурбинных – 30–37 %, в газопоршневых – 38–48 %, в парогазовых – 53–62 %. При разработке ТЭО технических решений следует учитывать как CAPEX, так и OPEX. Международный опыт показывает, что стоимость электрической энергии в 2,5–6 раз выше тепловой. В частности, в центральной части РФ – в 4–6 раз, в других регионах РФ – до 6–7 раз. Именно поэтому стоит рассматривать операционные затраты когенерации гринфилд-проектов.

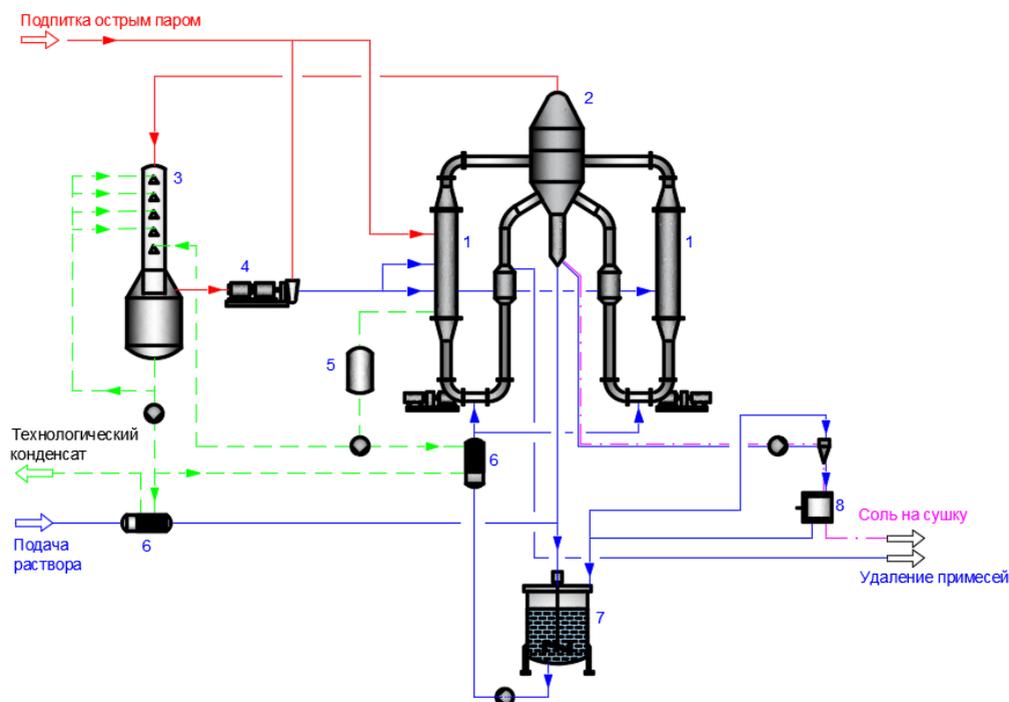


Рисунок 2. Механическая рекомпрессия пара: 1 – теплообменник; 2 – испаритель (кристаллизатор); 3 – скруббер; 4 – компрессор; 5 – конденсатосборник; 6 – подогреватель; 7 – уравнивательный бак; 8 – центрифуга

Figure 2. Mechanical steam recompression: 1 – heat exchanger; 2 – evaporator (crystallizer); 3 – scrubber; 4 – compressor; 5 – condensate collector; 6 – heater; 7 – equalizing tank; 8 – centrifuge

Таблица 1. Технические характеристики и стоимость применения MEE и MVR на утилизацию 1 млн м³ рассолов в год
Table 1. Technical characteristics and cost of using MEE and MVR for the disposal of 1 million cubic meters of brines per year

OPEX	MEE	MVR
Расход греющего пара с котельной, т/ч	230	11
Установочная мощность, кВт	3500	27 100
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	6500	850
Удельная стоимость пара, руб./кг	0,6	0,6
Удельная стоимость электроэнергии, руб./(кВт · ч)	2,43	2,43
Фонд рабочего времени, ч/год	8000	8000
Стоимость пара (в год), млн руб.	1104	53
Стоимость электроэнергии (в год), млн руб.	64,04	526,82
Всего, руб.	1 172 040 000	579 620 000
Всего, евро	15 026 154	7 431 077

Так, если 1 единица тепла стоит 1 условный доллар, то 1 единица электроэнергии будет стоить 4 у. е. Если КПД современных котлов достигает 95 %, то доход может быть в размере 95 у. е. Суммарная стоимость генерируемых энергетических ресурсов одной установки будет определяться формулой:

$$F = F_{эл} + F_{т} [у. е.].$$

Таким образом, можно оценить экономический потенциал когенерационных установок. Если рассмотреть установку с одним котлом и четырьмя турбинами, то получаем следующее:

– в паротурбинной установке (ПТУ) получают в среднем 34 единицы электрической энергии и 53 единицы тепловой, тогда:

$$F_{ПТУ} = 34 \cdot 4 + 53 \cdot 1 = 189 \text{ у. е.};$$

– для газотурбинной установки (ГТУ) этот показатель составит:

$$F_{ГТУ} = 33 \cdot 4 + 52 \cdot 1 = 184 \text{ у. е.};$$

– для газопоршневой (ГПУ):

$$F_{ГПУ} = 43 \cdot 4 + 46 \cdot 1 = 218 \text{ у. е.};$$

– для парогазовой (ПГУ):

$$F_{ПГУ} = 55 \cdot 4 + 33 \cdot 1 = 253 \text{ у. е.}$$

По отношению к обычной котельной экономический эффект достигнет 199, 194, 229 и 266 % соответственно. Таким образом, техническое решение по когенерации в процессе выпаривания рассолов в среднем на 200–270 % выгоднее по сравнению с использованием котельных.

Утилизацию отходящих газов ТЭЦ стоит рассматривать с применением абсорбционной холодильной установки АБХМ (тригенерация) для производства заоложенной воды. Когенерационно-тригенерационный цикл позволяет применять ресурсосберегающие технологии и делает калийное производство энергоэффективным и является предметом детального анализа на стадии Pre-FEED и FEED.

Для разработки оптимальной технологии и принятия рациональных технических решений по утилизации избыточных рассолов необходимо на всех стадиях проекта выполнять последовательное изучение и анализ не только технологических решений, но и инфраструктурных и экологических рисков. Например, на стадии Pre-FEED необходимо концептуально проработать все возможные промышленные методы утилизации с определением объемов переработки, технико-экономических обоснований технических решений и экологических аспектов.

Дальнейшее развитие проекта потребует выполнения укрупненной технико-экономической оценки (РЕА) с введением дополнительных факторов – анализа выбросов CO₂ и социальных рисков [9].

Проблемы применения технологии закачки избыточных рассолов. В целом, рассматривая мировые тенденции по переходу предприятий на «зеленое производство», внедрение таких инструментов, как углеродные налоги и системы торговли квотами (СТК, emissions trading system, ETS), целесообразно рассматривать комбинированный подход с ранжированием всего объема перерабатываемых рассолов [10]. Например, возможное решение по утилизации избыточных рассолов больших рассолохранилищ (объемом более 3 млн м³ в год) – это применение узла выпаривания с получением технической соли и УЗИР с соотношением 60 на 40 %. Данная пропорция определяется наличием поглощающих горизонтов и их приемистостью, а также сравнительным анализом капитальных затрат на выпаривание и УЗИР. В настоящий момент нормативно-правовая база, регулирующая обоснование и оформление УЗИР в России, находится в стадии становления [11]. Например, документ, регламентирующий порядок рассмотрения заявок на получение права пользования недрами для размещения в пластах горных пород жидких отходов, образующихся у пользователей недр, осуществляющих разведку и добычу, а также первичную переработку калийных и магниевых солей, был принят только в ноябре 2019 г.

Последовательность выполнения работ не прописана однозначно, так как для подачи заявки на геологическое изучение (в чистом виде Greenfield) требуются «заключение государственной экспертизы геологической информации о предоставляемом в пользование участке недр» и «сведения в отношении участка недр, намечаемого для строительства, а также вод, образующихся у пользователей недр, осуществляющих разведку и добычу, и первичную переработку калийных и магниевых солей». Это значит, что недропользователь должен выполнить предпроектную проработку, (включая сейсмическое исследование территории и бурение скважин со сбором информации о коллекторах) [12]. Далее после получения лицензии необходимо разработать проект геологоразведочных работ в соответствии с требованиями. При этом нужно отметить,

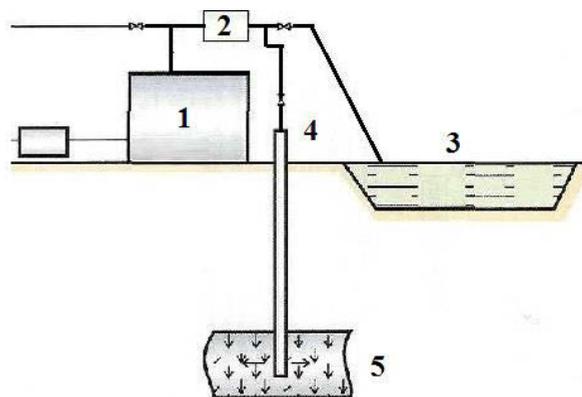


Рисунок 3. Укрупненная система утилизации избыточных рассолов: 1 – емкости по накоплению побочных продуктов на обогатительной фабрике; 2 – насосный парк; 3 – рассолохранилище; 4 – система закачивающих скважин; 5 – принимающий пласт
Figure 3. Enlarged system of disposal of excess brines: 1 – storage tanks for the accumulation of by-products at the processing plant; 2 – pumping park; 3 – surface brine storage; 4 – injection well system; 5 – receiving subsoil layer

что в России в настоящий момент есть требования по пластовым водам в нефтяной и газовой промышленности, а для избыточных производств рассолов требования отсутствуют [13].

Открытым остается и вопрос по прохождению экологической экспертизы, а именно: является ли проект геологоразведочных работ объектом такой экспертизы. Далее после прохождения экспертизы геологической информации требуется разработка проекта комплекса по закачке. Таким образом, вопрос по оценке экономической эффективности комплекса закачки должен быть решен недропользователем уже на начальной стадии, так как выполнение полного комплекса изучения потребует больших капитальных затрат при отсутствии достаточного объема информации [14]. Таким образом, с определенной долей уверенности можно говорить о перспективности применения технологии УЗИР, что возможно при соблюдении следующих факторов в порядке их значимости:

1. Наличие детального геологического изучения района калийного комбината геофизическими методами и геотектонических схем;
2. Расположения калийного комбината в нефте-(газо)добывающем регионе или потенциально нефтегазоносном, где выполнялось изучение коллекторов;
3. Детальной проработки инфраструктурных и экологических рисков.

При анализе экологических рисков и подготовке программы мониторинга окружающей среды обязательно использование дистанционных и высокоточных методов контроля неотектонических движений и процессов на земной поверхности, что позволит не только своевременно предотвратить риски, касающиеся работы комплекса, но и нивелировать их воздействие на недра и окружающую среду.

Проблемы применения технологии обратной закладки. Существующие технологии обратной закладки отходов процесса обогащения имеют ряд особенностей. В первую очередь ограничивающим фактором может являться объем свободного подземного пространства. Как

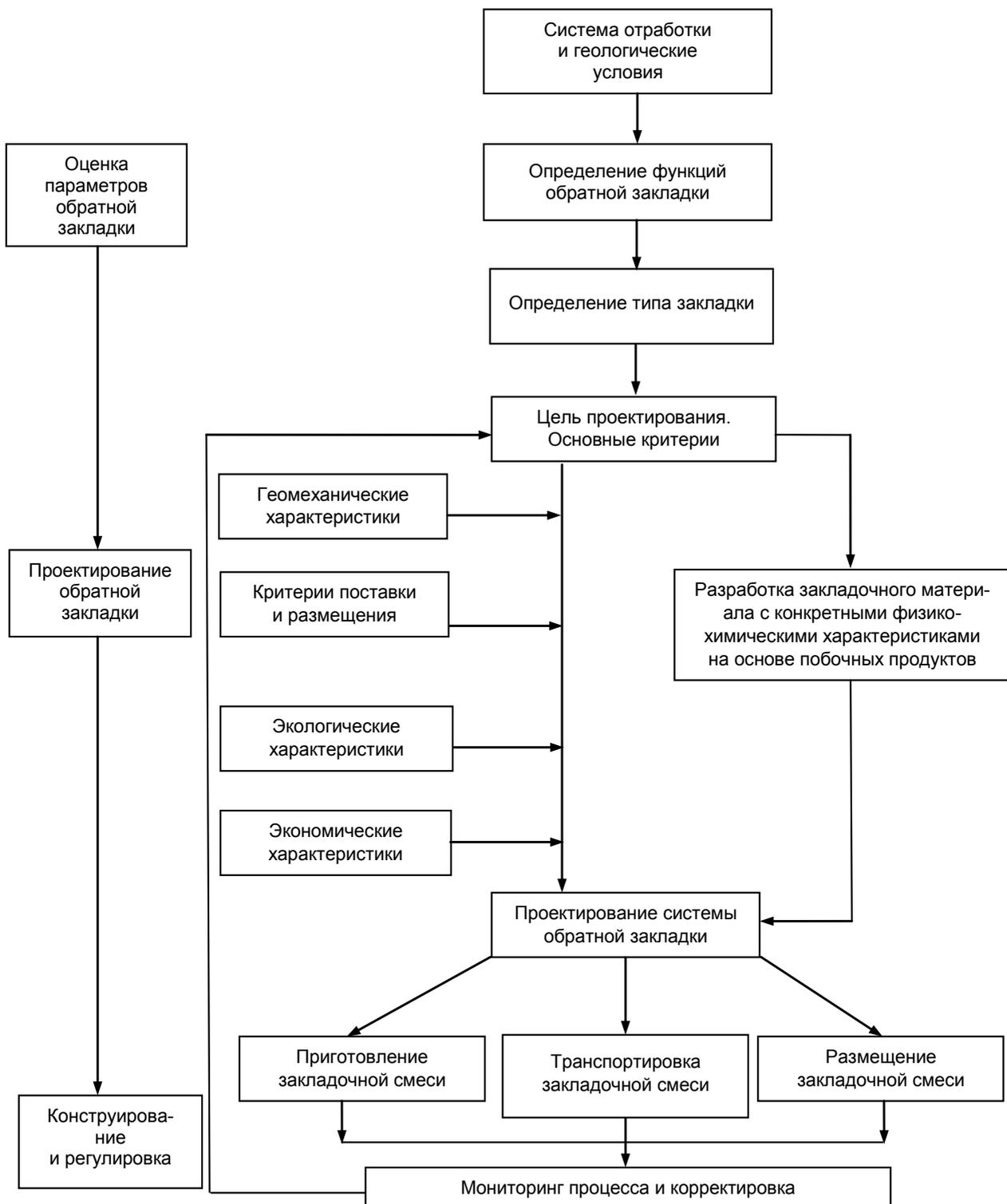


Рисунок 4. Порядок разработки и внедрения системы обратной закладки на шахтах по добыче полиминеральных солей
Figure 4. The procedure of development and implementation of a backfilling system at the processing of polymineral salts

следствие, критическое значение для утилизации отходов данным способом приобретает календарный план работ по месторождению. Далее следует упомянуть геомеханическое обеспечение устойчивости заполняемых камер.

До проведения закладочных мероприятий следует определить минимальную требуемую прочность, которую должна набирать закладочная масса с течением времени. Исходя из этого, руководством предприятия принима-

ется решение об использовании вяжущих компонентов в закладочной смеси. Устройства, входящие в состав закладочных трубопроводов, и сами трубы подвергаются сложному гидроабразивному воздействию потока. Это связано в первую очередь с особенностями их функционирования, изменением параметров проводимой (перекачиваемой) среды, спецификой геометрии соединений, разнообразием применяемых материалов. Безус-

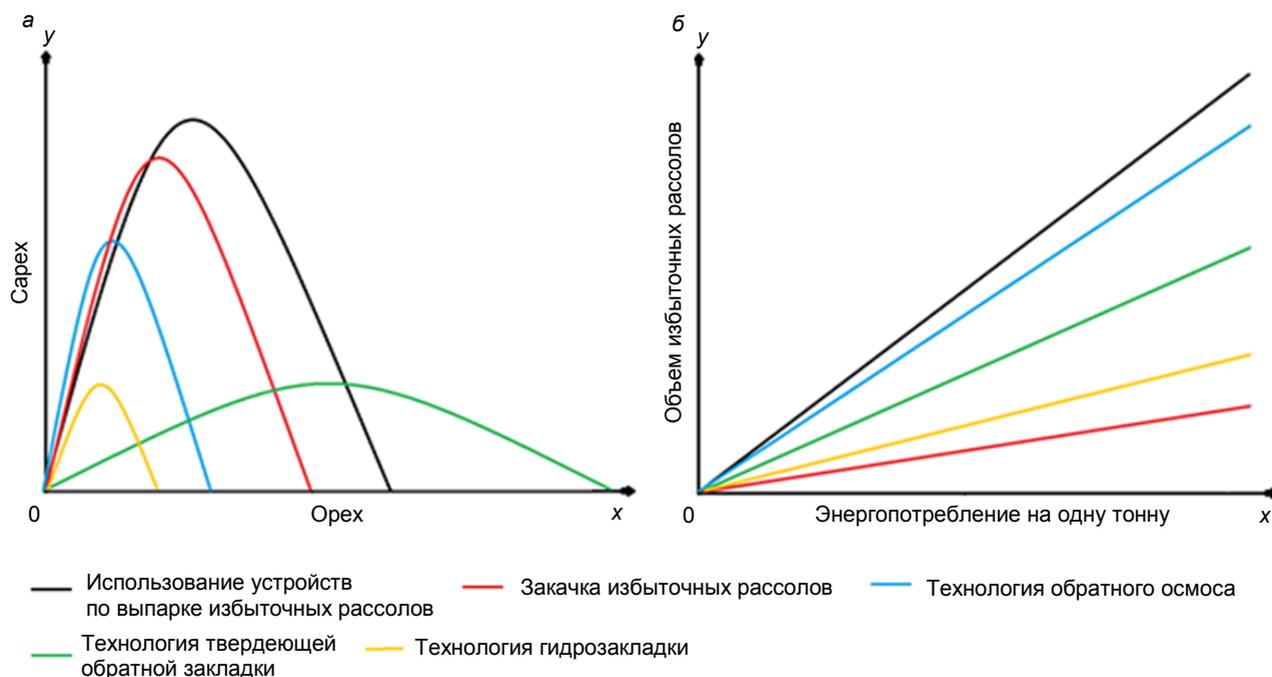


Рисунок 5. Обобщенные зависимости: а – объема капитальных и операционных затрат при применении различных технологий утилизации избыточных рассолов; б – объема утилизации избыточного рассола от потребления энергии на одну тонну утилизируемого вещества

Figure 5. Generalized dependencies: a – the volume of capital and operating costs by usage of various technologies for the disposal of excess brines; b – the volume of disposal of excess brines from energy consumption per ton of the disposed substance

ловно, эксплуатация подобных систем и поддержание их работоспособного состояния и надежности в целом является нетривиальной проблемой [12].

Говоря о надежности трубопроводов как системы, функционирующей в условиях гидроабразивного износа, важно учитывать не только текущие процессы и факторы, возникающие в ходе самого этапа эксплуатации, но также параметры, формирующие ее технические и технологические характеристики. Так, на этапе проектирования трубопроводов на последующую эксплуатационную надежность влияют рациональность проектных решений (последовательность расположения элементов системы и их соответствие друг другу и технологическим параметрам), выбор материалов и комплектующих, выбор режимов эксплуатации [14].

В результате использование метода обратной закладки – это комплексная задача, стоящая перед недропользователями. Она требует единого порядка работ, учитывающего всю ранее приведенную проблематику (рис. 4). Таким образом, создается ситуация, при которой применение каждого из методов управления побочными продуктами полиминерального производства имеет ряд ограничений либо технического, либо природного и экономического характера. Это ведет к необходимости комбинирования методов как для обеспечения объемов производства, так и его экологической безопасности.

Комбинирование технологий утилизации при добыче и переработке калийных руд. Исследуя в целом вопрос оптимальности выбора технологии утилизации избыточных рассолов на калийных предприятиях, следует учитывать целый комплекс факторов. Так, важное зна-

чение имеют не только эффективность доизвлечения полезных компонентов из отработанных щелоков, проблема поддержания экологической безопасности производства, а также обеспечение стабильности горного массива твердеющей обратной закладкой, но и экономические затраты на реализацию данных мероприятий [14].

В первую очередь стоит сказать о том, что затраты на каждую из обозначенных схем могут быть капитальные и переменные. Например, к капитальным затратам могут быть отнесены: создание поверхностного складочного комплекса, установка на предприятиях системы когенерации и тригенерации, покупка лицензии на закачку в глубокие горизонты и т. д.

К переменным затратам можно отнести: покупку дополнительных реагентов и вяжущих компонентов, расходных материалов, оплату налогов и сборов. Частично данные затраты могут компенсироваться за счет появления дополнительных объемов продукции для реализации или снижением отчислений за побочную нереализованную продукцию (рациональным использованием недр).

Таким образом, с математической точки зрения рассматриваемую проблему можно представить как ряд функциональных зависимостей (рис. 5). С одной стороны, поиск минимального значения площади из функций (в упрощенной схеме это двумерная модель, результирующими которой являются капитальные и операционные затраты на технологические процессы), а с другой стороны, как наиболее эффективное соотношение объемов утилизируемого материала к энергетическим затратам [15, 16].

В результате будет получена система уравнений, ре-

шение которой $R = (S_n, F_n)$ позволит найти оптимальное соотношение применяемых технологий по утилизации избыточных рассолов в условиях конкретного проекта [17, 18]. Необходимо отметить, что в обоих уравнениях оптимумом будет минимальное значение показателей (как по капитальным и текущим затратам на утилизацию щелоков S_{opt} , так и по энергопотреблению на 1 т утилизируемого щелока F_{opt}).

$$R = \begin{cases} S_{\text{opt}} \rightarrow \min = \frac{\partial S}{\partial S_n}, \text{ где } S_n = \int_0^2 ax - x^2 dx; \\ F_{\text{opt}} \rightarrow \min = \frac{\partial F}{\partial F_n}, \text{ где } F_n = \frac{1}{2} ab. \end{cases}$$

Заключение

Безусловно, на предприятии может существовать одно технологическое решение по утилизации избыточных щелоков, и тогда оно будет определяться описанным способом. Однако, как правило, компания решает не только задачи минимизации финансовых затрат на утилизацию, но и ряд технических и технологических задач (обеспечение геомеханической стабильности отработываемого шахтного поля, обеспечение экологичности процессов утилизации, рациональное освоение недр) [19, 20].

Данные факторы могут значительно влиять на выбор той или иной технологии по утилизации избыточных щелоков. Как правило, по различным причинам на предприятии может одновременно применяться несколько технологий.

Геоэкологическое обеспечение безопасности и стабильности развития территории, на которой находится подобное производство, требует проведения комплексных исследований на возможность применения перечисленных методов. Устойчивое развитие региона, прилегающего к предприятию по добыче и переработке полиминерального сырья, будет возможно только в случае, если возможности и безопасность природной среды по принятию побочных продуктов будут учитываться и приниматься в качестве приоритетной цели.

Моделирование показывает, что для предприятий, производящих сульфат калия на основе шахтной добычи, оптимальное сочетание технологий по объемам утилизации избыточных щелоков составляет: 60 % утилизируются путем использования вакуум-выпарных установок, 20 % – при помощи закачки избыточных рассолов, 10–20 % приходится на технологии обратной закладки или получение дополнительной продукции.

ЛИТЕРАТУРА

- Каплунов Д. Р., Радченко Д. Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. № 11. С. 121–125. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
- Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams // Technology audit and production reserves. 2019. Vol. 5. № 49(3). С. 33–40. <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2019.184940>
- Ляшенко В. И., Голик В. И., Дятчин В. З. Складирования хвостов в подземное выработанное пространство и хвостохранилище в виде твердеющих масс // Обогащение руд. 2020. № 1. С. 41–47. <http://dx.doi.org/10.17580/or.2020.01.08>
- Battistelli A., Nagy S. Reservoir engineering assessment of low-temperature geothermal resources in the Skierniewice municipality (Poland) // Geothermics. 2000. Vol. 2. Issue 6. С. 701–721.
- Scott M., Jernqvist A., Aly G. Experimental and theoretical study of an open multi-compartment absorption heat transformer for different steam temperatures. Part III: application to process industry // Applied Thermal Engineering. 1999. Vol. 19. Issue 4. С. 431–448. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00061-1)
- Donnellan P., Cronin K., Byrne E. Recycling waste heat energy using vapour absorption heat transformers: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. С. 1290–1304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.002>
- Urbanucci L., Testi D. Integration of reversible absorption heat pumps in cogeneration systems: Exergy and economic assessment // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 200. Article number 112062. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112062>
- Sridevi B. R., Hoskeri P. A., Joseph C. M. Effect of annealing on the optical, structural and electrochromic properties of vacuum evaporated manganese phthalocyanine thin films // Thin Solid Films. 2021. Vol. 723. Article number 138584. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138584>
- Высоцкая Н. А., Пискун Е. В. Основные факторы неблагоприятного воздействия на окружающую среду деятельности калийного производства и способы ее защиты // Горные науки и технологии. 2019. Т. 4. № 3. С. 172–180. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2019-3-172-180>
- Gao W., Qi J., Zhang J., Chen G., Wu D. An experimental study on explosive boiling of superheated droplets in vacuum spray flash evaporation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 144. Article number 118552. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118552>
- Chaikovskiy I. I., Korotchenkova O. V., Trapeznikov D. E. A new genetic type of leaching zone in salts of the Verkhnyaya Kama potassium salt deposit: hydrochemical, mineralogical, and structural indicators // Lithology and Mineral Resources. 2019. Vol. 54 (4). P. 308–319. <http://dx.doi.org/10.1134/S0024490219040023>
- Морозов И. А., Ударцев А. А., Паньков И. Л. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // ГИАБ. 2020. № 10. С. 16–28. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28>
- Deng B., Jia Z., Liu W., Liu X., Gu J., Ye W., Wen X., Qu Z. Selective water plugging technology for horizontal well with screen completion // Energies. 2021. Vol. 14. Issue 4. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/en14040791>
- Ali G., Fall M., Alainachi I. Time And Temperature-Dependence of Rheological Properties of Cemented Tailings Backfill with Sodium Silicate // Journal of Materials in Civil Engineering. 2021. Vol. 33. Issue 3. P. 0402–0498. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003605](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003605)
- Белкин В. В. Комплексное использование минерально-сырьевых ресурсов соленосных впадин и охрана недр // Горный журнал. 2002. № 4. С. 19–24.
- Petlovanyi M., Mamaikin O. Assessment of an expediency of binder material mechanical activation in cemented rockfill // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14. No. 20. P. 3492–3503.
- Зыкина А. В. Последовательная оптимизация для многокритериальной задачи // Экономика и математические методы. 2006. Т. 42. № 1. С. 110–118.
- Minh D. H., Binh P. Van, Phuong B. Van, Duc N. V. Multi-criteria design of mechanical system by using visual interactive analysis tool // Journal of Engineering Science and Technology. 2019. Vol. 14. Issue 3. P. 1187–1199.
- Zavadskas E. K., Pamučar D., Stević Ž., Mardani A. Multi-criteria decision-making techniques for improvement sustainability engineering processes // Symmetry. 2020. Vol. 12. Issue 6. P. 14–19. <https://doi.org/10.3390/sym12060986>
- Cibulski L., Mitterhofer H., May T., Kohlhammer J. PAVED: Pareto Front Visualization for Engineering Design // Computer Graphics Forum. 2020. Vol. 39. Issue 3. P. 405–416. <http://dx.doi.org/10.1111/cgf.13990>

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2021 года

Complex approach to the issue of the efficiency of excess brines utilization at potash mining and processing plants

Pavel Sergeevich SHCHERBAN'^{1*}
Aleksandr Olegovich GAPCHICH^{2**}
Aleksy Vladimirovich ZHDANOV^{3***}
Ol'GA Nikolaevna LETUNOVSKAYA^{4****}

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

²Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Moscow, Russia

³Russian State Geological Prospecting University, named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow, Russia

⁴Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Purpose. The paper analyzes the positive and negative aspects of various technological solutions for the usage of liquid brines during the development of polymineral deposits, considers the problem of determining the choice of the optimal approach by taking into account geological, technical, environmental and financial factors.

Methods. The study reviews the utilization and reduction of the brines liquid component in the production of potash fertilizers with simultaneous reduction of loss of valuable components with liquid discharges and, due to this, increasing the production of potash fertilizers. At the same time usage of mine brines in reviewed technology, is an urgent and important scientific and technical task of the potash industry. Technologically, several alternative solutions are possible to reduce the number of liquid by-products placed in sludge storage facilities. A set of analytical methods was used in the work, including statistical data processing, modeling, pre-design studies of technological solutions, and assessment of economic costs.

Results. Excess brines of potash enterprises are liquid waste obtained during the production of potash MOP and SOP fertilizers. The accumulation of excess brines in sludge storage facilities is estimated at millions of cubic meters per year. The expansion of the area of sludge storage facilities and the construction of dams is only a temporary solution and is associated with risks in the design, construction and operation of hydraulic structures, which increases the risks of brine leakage into surface and subsurface water basins. These moments increase the necessity of other methods of brine disposal. Depending on the nature of the processed polymineral ores, several methods can be used in combination for the disposal of excess brines at once – backfilling, osmosis, injection into deep horizons, multi stage evaporation.

Conclusions. For enterprises processing potassium-magnesium raw materials, the most optimal combination of technologies of brine reduction is: usage vacuum evaporation plants dispose 60%, 20 % by pumping excess brines, 10–20% should be used for in backfilling or in production of additional products.

Keywords: geocology of polymineral raw materials, rational use of mineral resources, excess brines, cogeneration, processing of potash ores, backfilling.

REFERENCES

1. Kaplunov D. R., Radchenko D. N. 2017, Design principles and selection of subsurface development technologies that ensure the sustainable development of underground mines. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no 11, pp. 121–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
2. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. 2019, Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology audit and production reserves*, vol. 5, no. 49(3), pp. 33–40. <http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372.2019.184940>
3. Lyashenko V. I., Golik V. I., Dyatchin V. Z. 2020, Storage of tailings in the underground developed space and tailings storage in the form of hardening masses. *Obogashhenie rud*, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.17580/or.2020.01.08>
4. Battistelli A., Nagy S. 2000, Reservoir engineering assessment of low-temperature geothermal resources in the skierniewice municipality (Poland). *Geothermics*, vol. 2, issue 6, pp. 701–721.
5. Scott M., Jernqvist Å., Aly G. 1999, Experimental and theoretical study of an open multi-compartment absorption heat transformer for different steam temperatures. Part III: application to process industry. *Applied Thermal Engineering*, vol. 19, issue 4, pp. 431–448. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00061-1)
6. Donnellan P., Cronin K., Byrne E. 2015, Recycling waste heat energy using vapour absorption heat transformers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1290–1304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.002>
7. Urbanucci L., Testi D. 2019, Integration of reversible absorption heat pumps in cogeneration systems: Exergy and economic assessment. *Energy Conversion and Management*, vol. 200, article number 112062. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112062>

✉Ursa-maior@yandex.ru

**gapchich.alexander@gmail.com

***a.zhdanov@k-potash.ru

****ol.let@yandex.ru

8. Sridevi B. R., Hoskeri P. A., Joseph C. M. 2021, Effect of annealing on the optical, structural and electrochromic properties of vacuum evaporated manganese phthalocyanine thin films. *Thin Solid Films*, vol. 723, article number 138584. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138584>
9. Vysotskaya N. A., Piskun E. V. 2019, The main factors of the adverse environmental impact of potash production activities and ways to protect it. *Gornye nauki i tekhnologii*, vol. 4, no. 3, pp. 172–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2019-3-172-180>
10. Gao W., Qi J., Zhang J., Chen G., Wu D. 2019, An experimental study on explosive boiling of superheated droplets in vacuum spray flash evaporation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 144, article number 118552. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118552>
11. Chaikovskiy I. I., Korotchenkova O. V., Trapeznikov D. E. 2019, A new genetic type of leaching zone in salts of the Verkhnyaya Kama potassium salt deposit: hydrochemical, mineralogical, and structural indicators. *Lithology and Mineral Resources*, vol. 54 (4), pp. 308–319. <http://dx.doi.org/10.1134/S0024490219040023>
12. Morozov I. A., Udartsev A. A., Pan'kov I. L. 2020, Analysis of deformation of salt rocks of the Gremyachinsky and Verkhnekamsky deposits in laboratory conditions. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'* (nauchno-tekhnicheskij zhurnal), no. 10, pp. 16–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28>
13. Deng B., Jia Z., Liu W., Liu X., Gu J., Ye W., Wen X., Qu Z. 2021, Selective water plugging technology for horizontal well with screen completion. *Energies*, vol. 14, issue 4, pp. 1–14. <https://doi.org/10.3390/en14040791>
14. Ali G., Fall M., Alainachi I. 2021, Time And Temperature-Dependence of Rheological Properties of Cemented Tailings Backfill with Sodium Silicate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 33, issue 3, pp. 0402–0498. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003605](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003605)
15. Belkin V. V. 2002, Integrated use of mineral resources of salt-bearing depressions and protection of mineral resources. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no 4, pp. 19–24.
16. Petlovanyi M., Mamaikin O. 2019, Assessment of an expediency of binder material mechanical activation in cemented rockfill. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 14, no. 20, pp. 3492–3503.
17. Zykina A. V. 2006, Sequential optimization for a multi-criteria task. *Ekonomika i matematicheskie metody*, vol. 42, no 1, pp. 110–118. (In Russ.)
18. Minh D. H., Binh P. Van, Phuong B. Van, Duc N. V. 2019, Multi-criteria design of mechanical system by using visual interactive analysis tool. *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 14, issue 3, pp. 1187–1199.
19. Zavadskas E. K., Pamučar D., Stević Ž., Mardani A. 2020, Multi-criteria decision-making techniques for improvement sustainability engineering processes. *Symmetry*, vol. 12, issue 6, pp. 14–19. <https://doi.org/10.3390/sym12060986>
20. Cibulski L., Mitterhofer H., May T., Kohlhammer J. 2020, PAVED: Pareto Front Visualization for Engineering Design. *Computer Graphics Forum*, vol. 39, issue 3, pp. 405–416. <http://dx.doi.org/10.1111/cgf.13990>

The article was received on November 23, 2021