ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 622.273.2

Разработка технологии закладки выработанного пространства при выемке

Е.Р.КОВАЛЬСКИЙ, К.В.ГРОМЦЕВ✉
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Ковальский Е.Р., Громцев К.В. Разработка технологии закладки выработанного пространства при выемке // Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 202-209. DOI: 10.31897/PMI.2022.36

Аннотация. Анализ мирового опыта разработки калийных месторождений показывает, что основные проблемы, возникающие при их освоении, – высокий уровень потерь полезного ископаемого, повышенная опасность затопления горных выработок в результате нарушения сплошности водозащитной толщи и развития аварийных водопритоков в выработанных пространствах рудников. Снижение потерь калийной руды может быть достигнуто за счет применения системы разработки длинными столбами, но такой способ ограничен особенностями геологического строения калийных месторождений и необходимостью сохранения сплошности водозащитной толщи при ее подработке. Безопасность подработки водозащитной толщи можно повысить за счет применения закладки выработанного пространства лав. Однако остается малоизученным вопрос о влиянии закладки на высоту зоны развития водопроводящих трещин. Проанализирован мировой опыт закладки выработанных пространств при разработке пластов длинными столбами и предложена технология размещения закладочных массивов, которая может решить приведенные проблемы. Рассмотренная технология и предлагаемые решения подкреплены лабораторными испытаниями закладочных материалов и математическим моделированием зон развития деформаций в вышележащих породах.

***Ключевые слова*:** длинные забои; закладочный массив; гидравлическая закладка; водозащитная толща; калийно-магниевые пласты

***Поступила*: 19.04.2021** ***Принята*: 25.05.2022** ***Онлайн*: 08.07.2022** ***Опубликована*: 13.07.2022**

Введение. Темпы добычи калийных руд постоянно возрастают, и такая тенденция будет сохраняться [1, 2]. Производство калийных удобрений ведется в Канаде, Белоруссии, России, Германии, Китае и в других странах [3]. В России сосредоточен 31 % мировых запасов калия. Добыча солей в России традиционным шахтным способом ведется на трех месторождениях: Верхнекамском, Илецком и Тыретском. На двух месторождениях – Гремячинском и Нивенском – ведутся работы по освоению запасов, которые также планируются к отработке подземным способом [4].

Специфика разработки калийных месторождений связана с высокой растворимостью солей и наличием водоносных горизонтов в покрывающих породах, поэтому актуальной задачей является предотвращение процессов, приводящих к затоплению рудника [5]. Недропользователи вынуждены снижать коэффициент извлечения до обоснованных пределов (в ряде случаев до 30 %) и применять щадящую технологию разработки короткими забоями с оставлением рудных целиков для сохранения безопасных условий подработки водозащитной толщи [6].

Анализ статистики катастрофических прорывов вод и рассолов в выработки калийных рудников показывает, что за последние 100 лет в мире такие случаи фиксировались в среднем раз в 3-5 лет, в России и странах ближнего зарубежья – раз в 10-20 лет (табл.1). В мировой практике было затоплено и не подлежало восстановлению порядка 80 соляных рудников [7], в том числе три рудника на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей [8-10]. Основная причина затопления рудников – образование техногенных водопроводящих каналов в покрывающей водозащитной толще в результате ее подработки, из-за чего до 50 % калийных предприятий в мире погибло еще до конца отработки запасов [11]. Прорыв рассолов в выработки калийного рудника приводит к его бесконтрольному затоплению, экологической катастрофе в регионе разработки,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

потере запасов и огромному экономическому ущербу [12]. Снизить вероятность образования водопроводящих каналов в водозащитной толще и дальнейшее затопление рудника возможно за счет управления кровлей с помощью закладки выработанного пространства в процесс добычи [13].

Таблица 1

Хронология аварий на калийных рудниках России

Год аварии	Рудник	Тип залежи	Происшествие
1979	Соль-Илецкий рудник № 1	Купольное	Затопление
1986	БКРУ-3	Пластовое	Затопление
1995	СКРУ-2	Пластовое	Обрушение
2006	БКРУ-1	Пластовое	Затопление
2014	СКРУ-2	Пластовое	Прорыв надсолевых вод

Таким образом, при разработке соляных месторождений необходимо решать две взаимосвязанные проблемы – высокий уровень потерь и повышенную опасность затопления горных выработок. Проблемы можно решить с помощью системы разработки длинными столбами с закладкой выработанного пространства. Но для этого необходимо обеспечить безопасность подработки водозащитной толщи с помощью закладки выработанного пространства.

При закладке выработанного пространства искусственно создаваемый закладочный массив выполняет роль несущего элемента и, следовательно, влияет на характер изменения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающего массива, в том числе в подработанных зонах. Однако, как показывает практика ведения горных работ на калийно-магниевых месторождениях, влияние закладочных массивов выработанного пространства лав на состояние водозащитной толщи (ВЗТ) не учитывается в существующей нормативно-технической документации [14]. Также недостаточно изучены вопросы эффективной технологии возведения закладочных массивов за длинными очистными забоями на калийных месторождениях и обоснования их необходимых физико-механических свойств.

Опыт отработки калийных рудников показывает, что экономия на закладочных работах несравнима с финансовыми потерями при затоплении рудника [15, 16]. По оценочным расчетам, в результате затопления рудника с утвержденными запасами на 20 лет отработки, недополученная прибыль составит около 60 млрд руб. Согласно матрице оценки последствий техногенных рисков [17], вероятность затопления рудника, характеризуемая частотой от 1 до 0,1 раза в год и финансовым ущербом предприятию более 100 млн долларов, следует относить к очень высокому риску, который требует немедленного внедрения мероприятий по его снижению и повышенного внимания со стороны недропользователя. В связи с высокими рисками затопления необходимость закладки выработанных пространств оправдана.

Опыт применения технологий селективной выемки на рудниках ОАО «Беларуськалий». Анализ текущего опыта разработки калийных месторождений показывает, что системы разработки длинными столбами с закладкой выработанного пространства при отработке соляных пластов нашли применение только на Старобинском месторождении [18]. На данном месторождении калийных солей относительно благоприятные горно-геологические и гидрогеологические условия, поэтому закладка применяется не для снижения развития водопроводящих трещин над выработанным пространством, а для размещения пустой породы из прослоек пластов в выработанном пространстве и повышения качества руды, доставляемой на фабрику.

Закладка ведется путем выкладки бутовых полос за механизированным комплексом с помощью метателей, расположенных в предварительно пройденных закладочных штреках. Недостатками данной схемы являются значительная усадка бутовых полос после контакта с породами кровли и их низкая несущая способность, обусловленная тем, что закладочный материал расползается в стороны под действием давления в виду отсутствия боковых упоров. Также данная технология не решает проблему утилизации жидких отходов, образующихся в результате обогащения калийной руды.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 202-209
DOI: 10.31897/PMI.2022.36
© Е.Р.Ковальский, К.В.Громцев, 2022

Опыт применения технологий полной механизированной закладки лав на угольных шахтах Китая. При разработке пологих угольных пластов закладка выработанных пространств лав нашла применение на угольных шахтах Китая. Закладка ведется с помощью специального закладочного оборудования, интегрированного в состав механизированного комплекса [19, 20]. Крепь в задней части оборудуется завальным перекрытием и уплотнительным устройством. К завальному перекрытию подвешивается закладочный скребковый конвейер, на который поступает закладочный материал и высыпается на почву выработанного пространства через отверстия, открываемые в решетке конвейера. После образования насыпи порода утрамбовывается уплотнительным устройством.

Недостатками являются сложность доставки закладочного материала с поверхности в выработанное пространство, необходимость периодических остановок очистного забоя в связи с длительностью закладочных работ, а также низкая технологичность полной закладки выработанного пространства. Данная технология также не решает проблему утилизации жидких отходов, образующихся в результате обогащения калийной руды.

Разработанная технология размещения закладочных массивов в выработанном пространстве лавы. В качестве альтернативы традиционным камерным системам разработки для условий перспективных калийно-магниевых месторождений может быть предложена технология размещения закладочных массивов в выработанных пространствах лав, оборудованных механизированными комплексами [21]. Закладку в виде твердеющей гидрозакладочной смеси предлагается размещать в выработанном пространстве внутри эластичных резервуаров из гидроизоляционного материала, которые располагаются в выработанном пространстве в виде полос, перпендикулярных забою лавы (рис.1). Твердеющая гидрозакладочная смесь доставляется в резервуары по закладочным трубопроводам, которые монтируются в предварительно пройденных конвейерном вентиляционном и закладочных штреках. По мере подвигания лавы проводится демонтаж участков закладочных трубопроводов. Резервуары крепятся к секциям крепи со стороны выработанного пространства или доставляются поштучно к месту расположения. Резервуары должны обеспечивать сохранение заданной формы при заполнении их на высоту выработанного пространства. За то время, пока заполняется ближайший к забою резервуар, предыдущий, заполненный, набирает прочность.

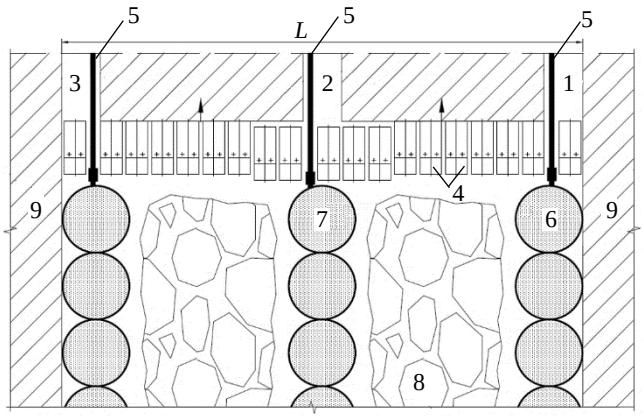


Рис.1. Принципиальная схема технологии размещения закладочных массивов в выработанном пространстве лавы [21]

1 – конвейерный штрек лавы; 2 – закладочный штрек лавы; 3 – вентиляционный штрек лавы; 4 – секции крепи; 5 – закладочный трубопровод; 6 – резервуар; 7 – закладочный материал; 8 – выработанное пространство; 9 – барьерный целик

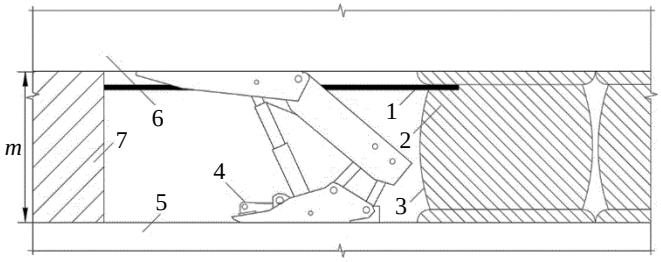


Рис.2. Схема расположения закладочных массивов в выработанном пространстве лавы

1 – закладочный трубопровод; 2 – закладочный материал; 3 – резервуар; 4 – секции крепи; 5 – почва; 6 – кровля; 7 – пласт

Рецептура закладочного массива подбирается таким образом, чтобы исключить образование водопроводящих каналов в водозащитной толще. Время достижения требуемой несущей способности закладочного массива задается в соответствии с требуемой скоростью подвигания забоя. К тому моменту, когда происходит контакт закладочного массива с породами кровли, закладочный массив имеет необходимые прочностные свойства (рис.2).

Параметры полос закладочных массивов – ширину, расстояние между ними и их количество – необходимо привязывать к параметрам сдвижения кровли. Высота трещинообразования после деформаций вышележащих пород должна быть меньше геологической мощности ВЗТ с оставлением предохранительной водозащитной потолочины [14].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Методология. Опыт отработки калийных месторождений показывает, что наиболее технологичными видами закладки в условиях соляных рудников являются [22]:

• сыпучая закладка из разрушенной пустой породы, полученная в результате проходческих работ или селективной выемки и размещаемая в выработанном пространстве механизированным способом (активно применяется на рудниках Старобинского месторождения) [16];

• гидравлическая «самотвердеющая» закладка на основе солеотходов, подаваемая в выработанное пространство в виде пульпы, отдающая рассол и кристаллизирующаяся (активно применяется на рудниках Верхнекамского месторождения, в том числе при образовании зон смягчения) [23].

В лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета были исследованы физико-механические и деформационные свойства закладочных массивов. Эксперимент проводился в два этапа для изучения каждого вида закладки (сыпучей и гидравлической) в условиях Нивенского месторождения [24].

На первом этапе эксперимента для сыпучей закладки исследовались зависимости усадки разрушенных соляных пород от приложенной нагрузки. Галитовая порода, используемая в ходе лабораторного эксперимента, была отобрана из кернового материала на Нивенском месторождения калийно-магниевых солей с глубины 1000-1100 м. Отобранный материал был подготовлен к испытаниям на одноосное сжатие путем предварительного дробления и отсеивания через группу сит (мм): 5,00-7,00; 3,00-5,00; 2,00-3,00; 1,00-2,00; 0,25-1,00; <0,25. Подобный диапазон фракционного разделения достаточно полно отвечает реальному гранулометрическому составу соляных пород при их механическом разрушении. Гранулометрический состав пустой породы с проходки выработок в зависимости от фракции крупности (мм) и суммарного содержания класса (%): 100,0-50,0/15,0; 50,0-25,0/17,0; 25,0-10,0/14,0; 10,0-5,0/12,0; 5,0-3,0/11,0; 3,0-2,0/9,0; 2,0-1,0/7,0; 1,0-0,5/5,0; 0,5-0,2/8,0; 0,2-0,1/2,0.

Испытания образцов проводились по фракциям в режиме заданных деформаций в стальном цилиндрическом сосуде размером 150×150 мм, т.е. в зажатой среде. Проведение испытаний насыпных образцов в таких условиях позволило отразить поведение исследуемого материала в упругом ядре объемного сжатия, образующемся внутри реального закладочного массива по мере того, как на него передается нагрузка от опускающихся пород кровли [14].

Результаты показали, что размер фракции выше 2 мм практически не влияет на снижение усадки, т.е. при большей концентрации мелкой фракции в составе закладки можно добиться улучшения компрессионных свойств.

После обработки экспериментальных данных была построена результирующая кривая усадки сыпучего галитового закладочного материала в зависимости от приложенной нагрузки (рис.3, *а*).

Согласно графику, на глубине залегания продуктивных пластов Нивенского месторождения (порядка 1100 м) после стабилизации процессов сдвижения следует ожидать усадки закладочного массива, оставленного в выработанном пространстве лав, до значений порядка 35 % от первоначальной высоты.

Полученная экспериментальная обобщенная кривая усадки сыпучего закладочного материала описывается уравнением:

$$\varepsilon=\varepsilon_0\left[1-e^{-\frac{\sigma}{n}}\right],$$

где ε_0 – деформационный параметр, зависящий от размера фракции сыпучего материала (в первом приближении для обобщенной кривой $\varepsilon_0 = 35$ %), %; σ – действующее на материал давление сжатия, МПа; n – эмпирический параметр, зависящий от размера фракции сыпучего материала (в первом приближении для обобщенной кривой $n = 7{,}3$ МПа), МПа.

Во втором этапе эксперимента для гидравлической закладки на основе солеотходов исследовались прочностные свойства образцов, образовавшиеся в результате естественной кристаллизации. Для изготовления гидрозакладочной пульпы была подготовлена измельченная галитовая порода, которая затворялась насыщенным рассолом. Процесс кристализации и затвердевания образцов длился до трех месяцев.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 202-209
DOI: 10.31897/PMI.2022.36
© Е.Р.Ковальский, К.В.Громцев, 2022

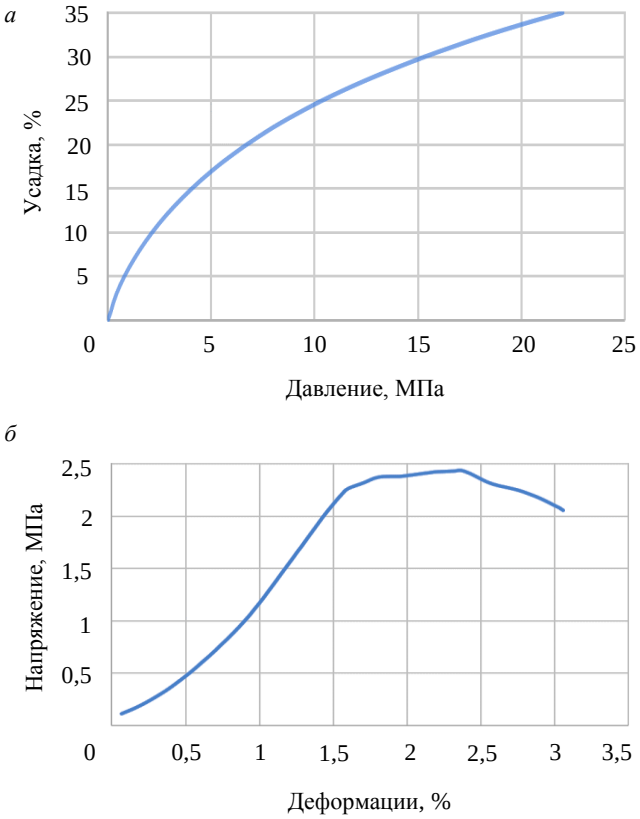


Рис.3. Обобщенный график зависимости усадки сыпучей закладки из разрушенного галита (*а*) и гидравлической закладки на основе солеотходов (*б*) от приложенного давления

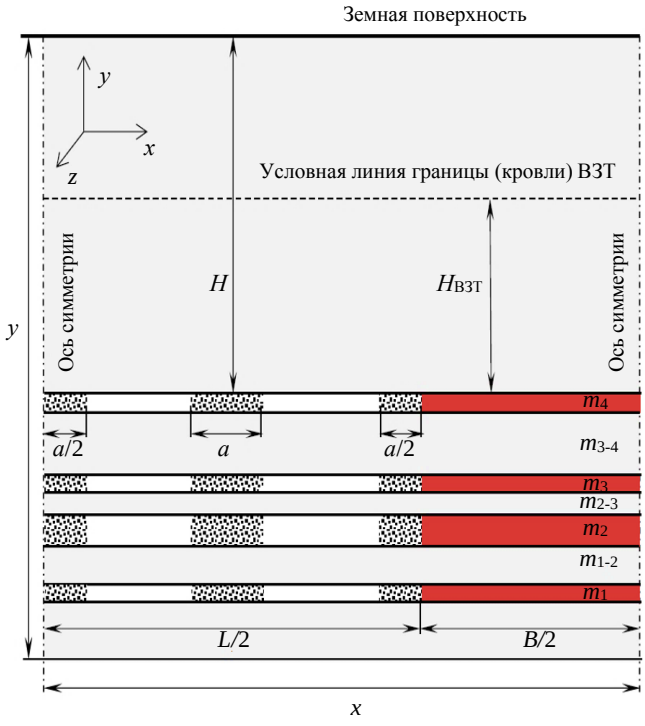


Рис.4. Эскиз расчетной схемы (модели) для размещения закладочного материала в выработанном пространстве лавы в форме полос из резервуаров

В ходе эксперимента удалось достичь застывания образцов в лабораторных условиях и образования кристаллических связей между частицами соли, что позволило формируемым образцам набрать прочностные характеристики. Готовые образцы закладочных массивов были испытаны на прочность и доведены до предельного состояния. После обработки экспериментальных данных была построена результирующая кривая деформаций закладочного массива на основе гидравлической закладки в зависимости от приложенной нагрузки (рис.3, *б*).

Прочностные свойства гидравлических массивов возможно увеличить до необходимого предела путем добавления вяжущих добавок в состав закладки [25, 26].

Полученные формы кривых совпадают с результатами исследований, выполненных специалистами на Старобинском и Верхнекамском месторождениях [14, 27], а также с зарубежным опытом исследования компрессионных свойств закладки [28].

Для оценки напряженно-деформированного состояния водозащитной толщи было проведено компьютерное моделирование [24, 29, 30]. На основе полученных данных в программном комплексе FLAC2D разработана горно-геомеханическая модель технологии размещения закладочных массивов в виде резервуаров в выработанном пространстве лав при отработке четырех калийных пластов на примере идеализированных условий Нивенского месторождения калийно-магниевых солей (рис.4). Для тех же условий смоделировано напряженно-деформированное состояние кровли при отработке пластов без применения закладки и при закладке бутовыми полосами по опыту ОАО «Беларуськалий» с последующем сравнением результатов.

Исходные данные для моделирования: количество разрабатываемых пластов – 4; нумерация пластов – снизу вверх; порядок отработки – нисходящий; залегание пластов – горизонтальное; лавы и межстолбовые целики расположены на разных пластах соосно; вынимаемая мощность первого пласта m_1 – 2 м; второго пласта m_2 – 4 м; третьего пласта m_3 – 2 м; четвертого пласта m_4 – 2 м; суммарная вынимаемая мощность m – 10 м; мощность между первым и вторым пластами m_{2-1} – 4 м; мощность между вторым и третьим пластами m_{3-2} – 2 м; мощность между третьим и четвертым пластами m_{4-3} – 10 м; глубина залегания кровли

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.36

Записки Горного института. 2022. Т. 254. С. 202-209
© Е.Р.Ковальский, К.В.Громцев, 2022

верхнего отрабатываемого пласта m_4 – H = 1100 м; геологическая мощность ВЗТ – H = 350 м; модуль Юнга вмещающих пород и пластов – 10000 МПа; коэффициент Пуассона – 0,3; предел прочности на растяжение – 1,0 МПа; сцепление – 5 МПа; угол внутреннего трения – 30°; длина лав на отрабатываемых пластах – L = 300 м; ширина межстолбовых целиков – B = 60 м; a – ширина закладочного массива (при моделировании принята равной 20 м).

Обсуждение результатов. На моделях показаны зоны развития вертикальных растягивающих деформаций над выработанным пространством лав, что соответствует образованию горизонтальных расслоений (рис.5). Данные области вместе с зонами горизонтальных растяжений в краевых частях выработанных пространств можно интерпретировать как возможные области формирования водопроводящих трещин. В случае отработки без закладки мощность зоны водопроводящих трещин (ЗВТ) составляет порядка 226 м по высоте над верхним отрабатываемым пластом (рис.5, *а*). Без проведения мероприятий по закладке выработанного пространства конечные оседания (после отработки всех четырех пластов в свите) на уровне ВЗТ составляют порядка 60 % от вынимаемой мощности, что может привести к формированию опасных условий подработки в краевых частях у длительно остановленных границ ведения горных работ.

При отработке с механизированной закладкой выработанного пространства в форме полос из сыпучего материала мощность ЗВТ составляет порядка 188 м по высоте над верхним отрабатываемым пластом (рис.5, *б*). Выкладка закладочного материала в виде полос уменьшает величину оседаний при сыпучей закладке до ~26,5 % от вынимаемой мощности.

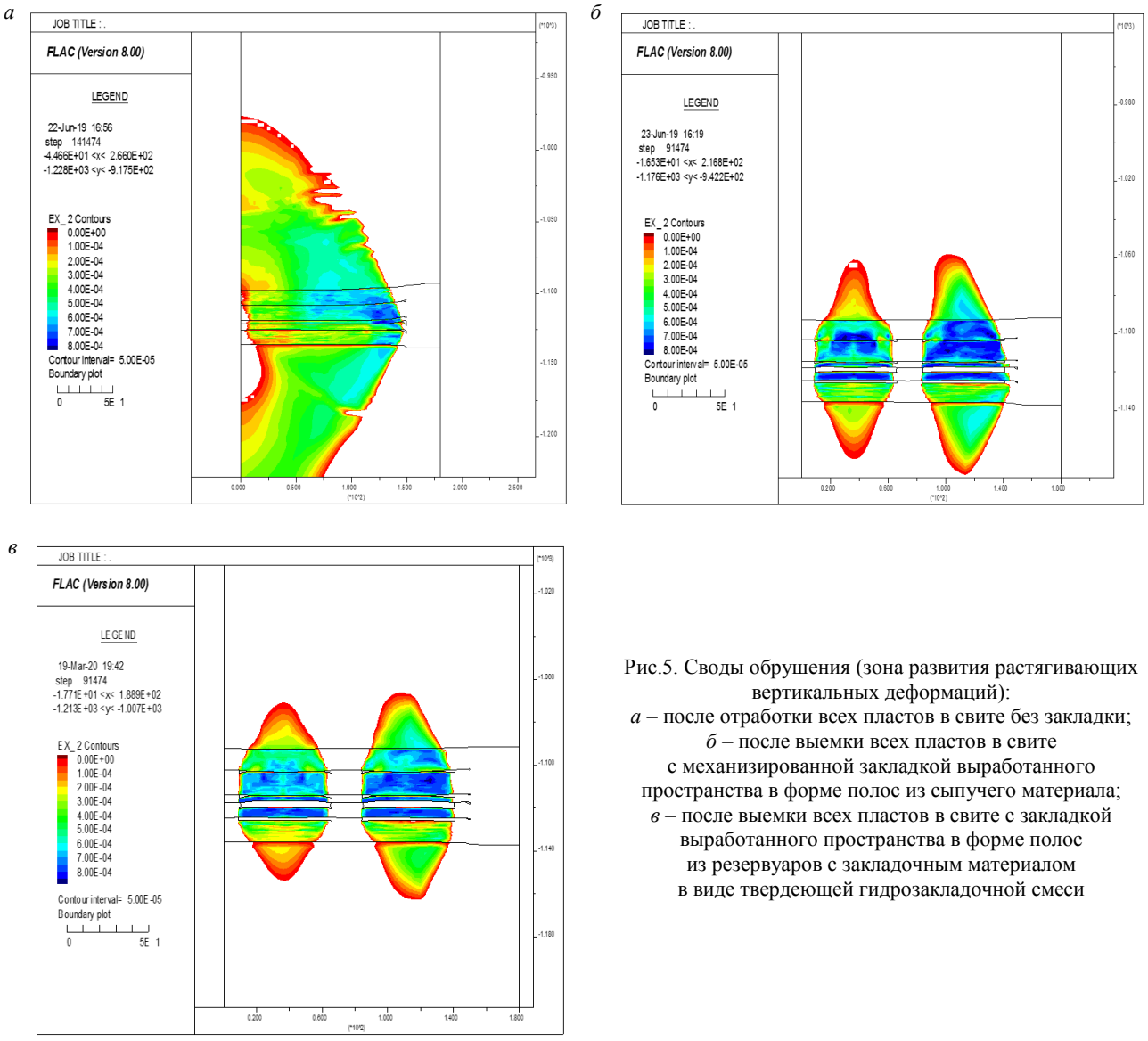


Рис.5. Своды обрушения (зона развития растягивающих вертикальных деформаций):
а – после отработки всех пластов в свите без закладки;
б – после выемки всех пластов в свите с механизированной закладкой выработанного пространства в форме полос из сыпучего материала;
в – после выемки всех пластов в свите с закладкой выработанного пространства в форме полос из резервуаров с закладочным материалом в виде твердеющей гидрозакладочной смеси

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Е.Р.Ковальский, К.В.Громцев, 2022

При отработке с закладкой выработанного пространства в форме полос из резервуаров с закладочным материалом в виде твердеющей гидрозакладочной смеси мощность ЗВТ составляет порядка 170 м по высоте над верхним отрабатываемым пластом (рис.5, *в*). Выкладка закладочного материала в виде полос из резервуаров уменьшает величину оседаний при гидравлической закладке до ~21 % от вынимаемой мощности. Результаты моделирования приведены в табл.2.

Таблица 2

Высота ЗВТ над кровлей свиты пластов

Этап отработки (нисходящий порядок)	Суммарная вынимаемая мощность, м	Без закладочных работ, м	Полосы из сыпучего материала, м	Полосы из твердеющей гидро-закладочной смеси, м
Первый пласт	2,0	186	117	102
Второй пласт	4,0	193	154	134
Третий пласт	8,0	226	175	163
Четвертый пласт	10,0	226	188	170

Заключение. Статистика разработки калийно-магниевых месторождений шахтным способом свидетельствует о том, что калийно-магниевые рудники функционируют в условиях очень высокого риска по фактору развития катастрофических процессов в водозащитной толще, приводящих к затоплению выработок и потере запасов. В связи с высокими рисками образования водопроводящих каналов в ВЗТ при разработке калийно-магниевых месторождений недропользователи вынуждены использовать щадящие методы добычи камерными системами с оставлением жестких целиков и с низким коэффициентом извлечения.

Предлагается размещать позади лав самотвердеющие гидрозакладочные массивы на основе солеотходов в виде полос, перпендикулярных забою лавы. Для предотвращения растекания пульпы она подается в эластичные резервуары, размещаемые за механизированной крепью. Такая технология позволяет совокупно решать проблемы избытка жидких отходов обогащения и снижения высоты водопроводящих трещин, а также, за счет возможного применения длинностолбовых систем под водоносными горизонтами, повышать коэффициент извлечения.

Как показывают результаты моделирования, уменьшение высоты зоны водопроводящих каналов над выработанным пространством моделируемой лавы при размещении позади забоя полос из самотвердеющего закладочного материала на основе солеотходов достигает 16 % от высоты зоны водопроводящих каналов без применения закладки и до 10 % от высоты зоны водопроводящих каналов с применением сыпучей закладки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дергачев А.Л., Старостин В.И.* Тенденции развития минерально-сырьевого комплекса на рубеже веков // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2018. № 1. С. 3-15. DOI: 10.33623/0579-9406-2018-1-3-15

2. *Ciceri D., Manning D.A.C., Allanore A.* Historical and technical developments of potassium resources // Science of The Total Environment. 2015. Vol. 502. P. 590-601. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.09.013

3. *Высоцкий Э.А., Губин В.Н., Кутырло В.Э.* Экономико-географические аспекты калийной промышленности мира // Вестник Брянского государственного университета. Серия 2. 2007. № 1. С. 90-96.

4. *Батурин Е.Н., Меньшикова Е.А., Блинов С.М. и др.* Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7513 (дата обращения 16.06.2021).

5. *Куликова А.А., Овчинникова Т.И.* К вопросу снижения геоэкологических рисков на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2-1. С. 251-262.

6. *Зубов В.П.* Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. 2018. № 6. С. 77-83. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.16

7. *Poborska-Młynarska K.* Katastrofy wodne w górnictwie solnym na świecie – przyczyny, sposoby zwalczania, skutki // PRZEGLĄD GÓRNICZY. 2018. Vol. 74. № 6. P. 33-41 (in Polish).

8. *Лаптев Б.В.* Аварийные ситуации на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 8. С. 28-31.

9. *Лаптев Б.В.* Историография аварий при разработке соляных месторождений // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 12. С. 41-46.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

10. *Санковский А.А., Алексеенко А.Г.* Анализ практического опыта отработки свит сближенных пластов в условиях рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей при использовании систем разработки короткими очистными забоями // Горная геомеханика. 2018. № 4 (125). С. 45-51.

11. *Шувалов Ю.В., Ковалев О.В., Мозер С.П. и др.* К вопросу снижения инвестиционных рисков при разработке калийных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 11. С. 366-372.

12. *Semenova T., Al-Dirawi A.* Economic Development of the Iraqi Gas Sector in Conjunction with the Oil Industry // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 7. № 2306. DOI: 10.3390/en15072306

13. *Fliß T., Marx H., Thona H.* Backfilling and Pillar Re-Mining in Potash Industry // MINEFILL 2011 – International Conference on Mining with Backfill, 21-25 March 2011, Cape Town, South Africa. K-UTEC AG Salt Technologies Sondershausen, 2011. P. 1-14.

14. *Дешковский В.Н., Новокшонов В.Н., Палто П.П.* Разработка методики расчета высоты распространения зоны водопроводящих трещин для столбовых систем разработки с частичной закладкой выработанного пространства в виде бутовых полос // Горная механика. 2007. № 2. С. 77-84.

15. *Зубов В.П., Смычник А.Д.* Снижение рисков затопления калийных рудников при прорывах в горные выработки подземных вод // Записки Горного института. 2015. Т. 215. С. 29-37.

16. *Kowalewski O., Spiewanowski P.* Stock market response to potash mine disasters // Journal of Commodity Markets. 2020. Vol. 20. № 100124. DOI: 10.1016/j.jcomm.2020.100124

17. *Porter M., Lato M., Quinn P., Whittall J.* Challenges with use of risk matrices for geohazard risk management for resource development projects // Mining Geomechanical Risk, 9-12 April 2019, Perth, Australia. Australian Centre for Geomechanics, 2019. P. 71-84. DOI: 10.36487/ACG_rep/1905_01_Porter

18. *Соловьев В.А., Аптуков В.Н., Чернопазов Д.С. и др.* Аспекты повышения эффективности разработки Верхнекамского калийного месторождения. Новосибирск: Наука, 2019. 179 с.

19. *Jixiong Zhang, Zhang Qiang, Qiang Sun et al.* Surface subsidence control theory and application to backfill coal mining technology // Environmental Earth Sciences. 2015. Vol. 74. P. 1439-1448. DOI: 10.1007/s12665-015-4133-0

20. *Xiaowei Feng, Nong Zhang, Lianyuan Gong.* Application of a Backfilling Method in Coal Mining to Realise an Ecologically Sensitive «Black Gold» Industry // Energies. 2015. Vol. 8. Iss. 5. P. 3628-3639. DOI: 10.3390/en8053628

21. Патент № 2735173 РФ. Способ закладки выработанного пространства при разработке пологих пластов длинными столбами / К.В.Громцев, Е.Р.Ковальский. Опубл. 28.10.2020. Бюл. № 31.

22. *Khayrutdinov A.M., Kongar-Syuryun Ch., Kowalik T., Faradzhov V.* Improvement of the backfilling characteristics by activation of halite waste for non-waste geotechnology // 12th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD. Students and Young Scientists, 15-16 October 2020, High Tatras, Slovaki. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. Vol. 867. № 012018. DOI:10.1088/1757-899X/867/1/012018

23. *Барях А.А., Губанова Е.А.* О мерах охраны калийных рудников от затопления // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 613-620. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613

24. *Ковальский Е.Р., Громцев К.В., Петров Д.Н.* Моделирование процесса деформирования междукамерных целиков в условиях закладки очистных камер // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 9. С. 87-101. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101

25. *Вотяков М.В.* Повышение полноты извлечения запасов калийных руд на основе закладки выработанного пространства галитовыми отходами: Автореф. дис. … канд. техн. наук. М.: Московский государственный горный университет, 2009. 24 с.

26. *Шкуратский Д.Н., Русаков М.И.* Использование отходов производства калийных удобрений в породных смесях для закладки выработанных пространств // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. № 3. С. 87-97.

27. *Шваб Р.Г., Дешковский В.Н.* Управление состоянием подрабатываемого массива горных пород частичной закладкой выработанного пространства в виде бутовых полос из разрушенного галита при извлечении запасов калийных руд столбовой системой разработки // Проблемы рационального природопользования: материалы международной научно-практической конференции, 29-31 октября 2008, Пермь, Россия. Изд-во ПГТУ, 2008. С. 56-63.

28. *Lüdeling C., Minkley W.* A Crushed-Salt Model with Creep, Compaction and Strain Softening, and Application to Tailings Heaps // 48th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 1-4 June 2014, Minneapolis, Minnesota, USA. One Petro, 2014. № ARMA-2014-7037. DOI:10.1002/nag.220

29. *Ковалев О.В., Мозер С.П., Тхориков И.Ю., Санковский А.А.* Алгоритм решения горно-геомеханических задач для условий отработки запасов нижних горизонтов калийных месторождений // Записки Горного института. 2014. Т. 207. С. 60-62.

30. *Ковальский Е.Р.* Цели и задачи численного эксперимента в горной геомеханике // Записки Горного института. 2013. Т. 205. С. 57-59.

***Авторы*: Е.Р.Ковальский,** *канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0002-6656-9377* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **К.В.Громцев,** *аспирант, kirillgromcev@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3687-2073* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0