

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ В УСЛОВИЯХ ЗАКЛАДКИ ОЧИСТНЫХ КАМЕР

Е.Р. Ковальский¹, К.В. Громцев¹, Д.Н. Петров¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: kirillgromcev@mail.ru

Аннотация: Актуальными проблемами при разработке месторождений калийно-магниевых солей являются низкий коэффициент извлечения руды и высокие риски затопления рудника. Закладка выработанных пространств позволяет комплексно решать эти проблемы. На основе рассмотрения мирового опыта разработки соляных месторождений с закладкой выработанного пространства в статье описаны виды закладки при разработке соляных месторождений, ее роль и задачи в управлении состоянием горного массива. Сделан вывод, что на данный момент в практике горных работ на калийно-магниевых месторождениях отсутствует научно-обоснованный учет влияния реактивного давления закладочных массивов на несущую способность и процессы деформирования соляных междукammerных целиков. С этой целью разработана компьютерная горно-геомеханическая модель, реализованная в программном комплексе FLAC 2D. Для моделирования разрыхленной соляной породы выполнены лабораторные исследования физико-механических свойств образцов из дробленой галитовой породы. С помощью модели получены параметры распределения деформаций и напряжений в системе «междукammerный целик – закладочный массив – вмещающие породы» при разной степени заполнения очистных камер гидравлической и сыпучей закладкой. По результатам моделирования сделаны выводы о влиянии типа закладочного массива и степени закладки выработанного пространства на состояние и процессы деформирования МКЦ. На основе компьютерной модели установлено, что закладка оказывает укрепляющее воздействие и повышает несущую способность целиков.

Ключевые слова: междукammerный целик, очистная камера, закладочный массив, степень закладки, калийно-магниевые пласты, компьютерное моделирование.

Для цитирования: Ковальский Е.Р., Громцев К.В., Петров Д.Н. Моделирование процесса деформирования междукammerных 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.

Modeling deformation of rib pillars during backfill

E.R. Kovalski¹, K.V. Gromtsev¹, D.N. Petrov¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: kirillgromcev@mail.ru

Abstract: Potash magnesium sulfate mining is currently faced with unfavorably low ore recovery and high flooding risks. Backfill offers a solution to this problem. This article reviews the international experience gained in salt mining with backfill, types of backfills, as well as the role and purpose of backfill in ground control. It is concluded that the present-day practice of

potash magnesium mining lacks a science-based analysis of a reaction pressure of fill masses on their load-bearing capacity and on deformation of rib pillars composed of salt rock. With this object in mine, a geomechanical model is constructed in FLAC 2D environment. For modeling loose salt rocks, the physical and mechanical properties of crushed halite were tested on a laboratory scale. The model determined the stress-strain behavior patterns in the rib pillar-fill mass-enclosing rock mass system at different degrees of filling in stopes with hydraulic and loose backfill. The modeling results allowed conclusions on the influence exerted by the type of backfill and by the stope filling with backfill on the stress-strain behavior of rib pillars. Backfill reinforces rib pillars and improves their load-bearing capacity.

Key words: rib pillar, stope, backfill, occupancy, degree of filling, potash magnesium beds, computer-aided modeling.

For citation: Kovalski E. R., Gromtsev K. V., Petrov D. N. Modeling deformation of rib pillars during backfill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(8):87-101. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-87-101.

Введение

В настоящее время добыча калийно-магниевого и соляных пластов пологого залегания ведется в мире в основном с применением камерно-столбовых систем разработки (кроме рудников Старобинского месторождения в Республике Беларусь, где гидрогеологические и горно-геологические условия позволяют применять длинные очистные забои, оборудованные механизированными комплексами, с управлением кровлей полным обрушением).

Такие системы разработки предполагают использование трех основных способов управления состоянием вмещающего массива (и их комбинаций): удержание кровли на жестких междукамерных целиках (МКЦ); удержание кровли на податливых МКЦ; закладка выработанного пространства очистных камер.

Основным условием применимости того или иного варианта системы разработки на месторождениях легкорастворимого горно-химического сырья является условие сохранения сплошности водозащитной толщи между отработываемыми пластами (рудными телами) и водоносными горизонтами [1–3]. Как показывает опыт отработки таких ме-

сторождений, наилучшие условия сохранности водозащитной толщи в долгосрочной перспективе обеспечиваются применением на них в качестве управления кровлей закладки выработанного пространства.

Большой опыт применения закладки как элемента камерной системы при разработке калийно-магниевого пластов накоплен на рудниках Верхнекамского месторождения. Применение закладки на данном месторождении позволяет в определенных условиях вовлекать в отработку дополнительные пласты, вести добычу работы в пределах влияния аномальных зон и городской застройки, снижать интенсивность процессов сдвига на ранее отработанных участках рудничных полей. Помимо Верхнекамского месторождения, закладка выработанного пространства очистных камер как способ управления горным давлением или утилизации отходов также широко применялась и применяется на калийных рудниках Германии и в единичных случаях — в других странах мира [4–9]. Кроме того, проектируемые в настоящее время горнотехнические системы рудников для перспективных российских месторождений калийно-магние-

вого сырья (Гремячинское, Нивенское) предполагают применение закладки как неотъемлемой и обязательной части процесса эксплуатации рудника и разработок месторождения.

Закладка выработанных пространств очистных камер при разработке соляных месторождений позволяет решить следующие задачи: частичная утилизация отходов; повышение коэффициента извлечения; снижение степени техногенного воздействия на подрабатываемую породную толщу и земную поверхность.

Опыт отработки калийно-магниевых и соляных месторождений показывает, что наиболее технологичными видами закладки в условиях таких месторождений являются:

- сыпучая закладка из разрушенной пустой породы (галита), полученная в результате проходческих работ или селективной выемки и размещаемая в выработанном пространстве механизированным способом;
- гидравлическая «самотвердеющая» закладка на основе солеотходов, подаваемая в выработанное пространство в виде пульпы и впоследствии отдающая рассол и кристаллизирующаяся.

Укрепляющая роль закладочного массива состоит в создании сил бокового отпора, действующих на междукамерный целик и снижающих скорость и величину его деформаций. При этом величина и интенсивность нарастания реактивного давления закладочного массива определяются компрессионными свойствами самого закладочного массива, параметрами охраняемого целика и величиной приходящей на него нагрузки.

Анализ научно-технических источников показывает, что фактор увеличения несущей способности соляных МКЦ и снижения интенсивности его деформирования за счет реактивного давления закладочного массива находится в настоящее время вне фокуса научно-про-

изводственных изысканий (за исключением единичных исследований — см., например, работы ученых Горного института УрО РАН и ОАО «Галургия» [10–12]). В результате в нормативно-технической документации горных предприятий отсутствует учет влияния реактивного давления закладочных массивов на несущую способность соляных МКЦ, что приводит к снижению коэффициентов извлечения на продуктивных пластах.

В этой связи несомненный научный и практический интерес представляют более детальные исследования взаимодействия элементов системы «междукамерный целик — закладочный массив — вмещающие породы» и укрепляющего воздействия закладочных массивов на МКЦ. В данной работе выполнены исследования указанного выше взаимодействия и оценено влияние закладочного массива на геомеханическое состояние и процесс деформирования МКЦ на основе применения компьютерного моделирования.

Методы исследования

Для оценки геомеханического взаимодействия системы «междукамерный целик — закладочный массив — вмещающие породы» была разработана компьютерная модель (расчетная схема), геометрические параметры которой приведены на рис. 1. Модель реализована в программном комплексе FLAC 2D [13, 14].

В расчетной схеме моделируется ленточный междукамерный целик шириной $b = 5$ м и высотой $a = 5$ м (коэффициент формы такого целика равен $k_{\phi} = a/b = 1$). Длина целика подразумевается достаточной для того, чтобы моделировать его поперечное сечение в постановке плоской деформации.

Ширина моделируемых камер по обе стороны от целика составляет 5 м. В силу симметричности задачи моделирует-

ся только половина ширины смежных с целиком камер. Вышележащая толща моделируется на высоту 10 м от кровли камер, а нижележащая — на глубину 10 м от почвы камер.

Во избежание перемещений модели в пространстве ее нижняя граница зафиксирована в вертикальном направлении (по оси Y), а боковые границы — в горизонтальном (по оси X).

На верхней границе модели граничные условия заданы в виде постоянных перемещений, направленных вниз по оси Y («режим заданных деформаций»). Соответственно, в процессе вычисле-

ний происходит сдвливание модели с постоянной скоростью, что позволяет оценить связь напряжений и деформаций, развивающихся при этом в целике.

Между целиком и вмещающими породами заданы условия полного сцепления, а на контакте пород и закладочного массива заданы условия неполного сцепления с возможностью проскальзывания. В модели предполагается, что образование камер и внесение в них закладочного материала происходит «условно-мгновенно». Контакт закладочного массива с целиком — плотный, т.е. без зазоров.

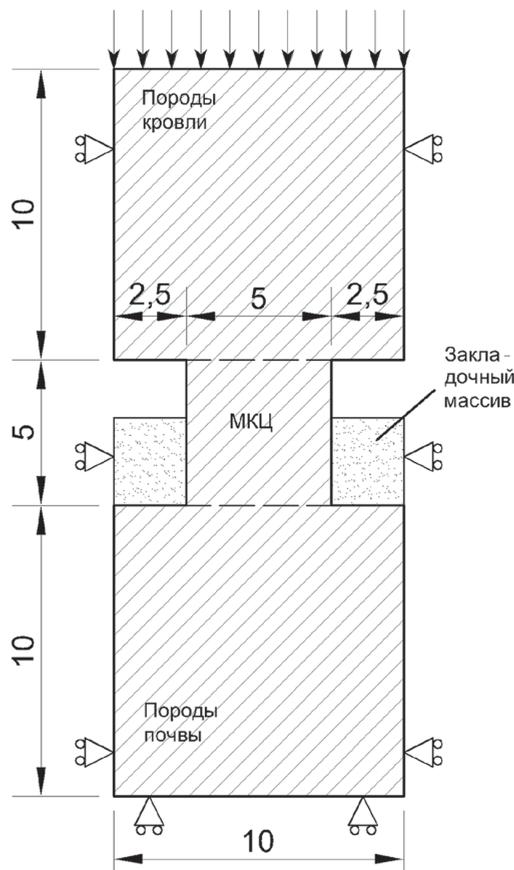


Рис. 1. Эскиз горно-геомеханической модели (расчетной схемы) для исследования характера взаимодействия элементов системы «междукамерный целик — закладочный массив — вмещающие породы»
 Fig. 1. Draft of geomechanical model (design) to study interactions in the rib pillar-backfill-enclosing rock system

Для простоты построения модели предполагается, что массив сплошной и изотропный. Моделируемые породы и геоматериалы подчиняются следующим геомеханическим законам деформирования:

- для пород кровли и почвы пласта принята упругая модель деформирования;
- для МКЦ принята упругопластическая модель Кулона-Мора с разупрочнением (в такой модели прочностные свойства среды «ухудшаются» с ростом деформаций);
- для сухой закладки принята модель «двойного течения» (double yield), в которой сопротивляемость нагрузкам растет по мере уплотнения материала (по мере роста в нем объемных деформаций);
- для гидравлической закладки принята классическая упругопластическая модель Кулона-Мора.

Сыпучие закладочные массивы представляют собой среду, которая: а) уплотняется с увеличением прикладываемой нагрузки и б) уплотняется со временем при действии постоянной нагрузки [15]. В «Лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород»

Центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета были проведены исследования зависимости усадки разрушенных соляных пород от приложенной нагрузки.

Галитовая порода, используемая в ходе лабораторного эксперимента, была подготовлена к испытаниям на одноосное сжатие путем предварительного дробления зерна (Нивенское месторождение, Калининградская область, глубина отбора ~1100 м, галит среднекристаллический) и пофракционного просеивания. Размер испытываемых фракций составлял от 1 до 10 мм, что покрывает примерно 60% от всего фракционного состава, образующегося при механическом разрушении соляной породы. Начальная насыпная плотность менялась в диапазоне от 1115 кг/м³ до 1168 кг/м³. Материал предварительно не трамбовался. Влажность материала в эксперименте не учитывалась. Испытания насыпных образцов проводились в стальной цилиндрической матрице диаметром 150 мм и высотой 150 мм на прессе MTS816 в режиме заданных деформаций. Скорость приложения нагрузки составляла 0,0166 мм/с. Нагрузка от пресс-

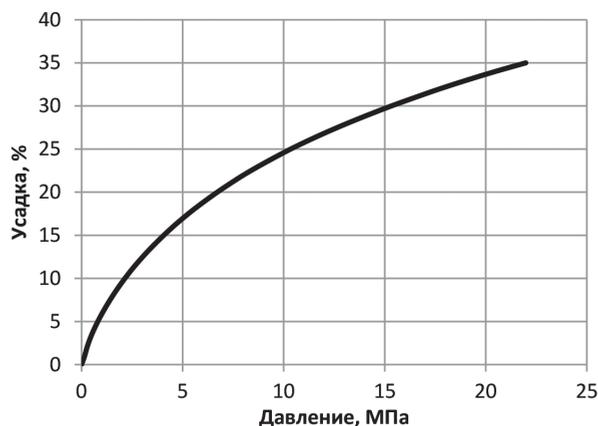


Рис. 2. Обобщенный график зависимости усадки сыпучей закладки из разрушенного галита от приложенного давления

Fig. 2. General graph of shrinkage loss in loose backfill made of crushed halite as function of applied pressure

са равномерно передавалась на раздробленный галитовый материал через стальную крышку.

После обработки экспериментальных данных была построена результирующая кривая усадки сыпучего галитового закладочного материала в зависимости от приложенной нагрузки (рис. 2).

Полученная экспериментальная обобщенная кривая усадки описывается уравнением

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

где ε — усадка сыпучего закладочного материала, %; 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, МПа (в первом приближении для обобщенной кривой $n = 7,3$ МПа).

Полученная форма кривой совпадает с результатами исследований, выполненных специалистами на Старобинском и Верхнекамском месторождении [10, 16, 17]. Отметим, что данный график получен для условий неутрамбованной породы. Испытания проводились в зажатой среде (насыпной материал не имел возможности «растекаться» в стороны, т.к. находился в сплошном цилиндре), т.е. для условий упругого ядра, формирующегося внутри объема сыпучего закладочного массива.

Для интеграции полученных результатов в горно-геомеханическую компьютерную модель в программном пакете FLAC 2D был смоделирован описанный лабораторный эксперимент. В итоге путем подбора свойств среды удалось получить удовлетворительную сходимость результатов компьютерного и лабораторного экспериментов.

Полученная компьютерная модель сыпучей закладки из раздробленной соляной породы характеризуется уплотняющейся средой double yield [18] со следующими свойствами: объемный вес закладочного массива 0,011 МН/м³; модуль объемного сжатия 181 МПа; модуль сдвига 240 МПа; угол дилатансии 0°; угол внутреннего трения начальный 0° (при нулевом значении прикладываемой нагрузки); угол внутреннего трения конечный 5° (при максимальном значении прикладываемой нагрузки 35 МПа).

Касательно компьютерного моделирования гидравлического закладочного массива следует отметить следующее. Конкретные физико-механические свойства такого массива во многом определяются рецептурой его приготовления составом солеотходов, наличием глинистых шламов, наличием и типом добавок и т.д.). В этой связи для моделирования следует принять некоторые его усредненные представительные характеристики. Анализ ряда научно-технических источников [7, 11, 19, 20] позволил установить для них следующие значения: объемный вес 0,0175 МН/м³; модуль объемного сжатия 833 МПа; модуль сдвига 385 МПа; сцепление 0,5 МПа; предел прочности на растяжение 0,1 МПа; угол внутреннего трения 20°.

Свойства МГП в модели подобраны таким образом, чтобы в обобщенном виде отразить поведение соляных пород под нагрузками (см., например, [21 — 23]). Для пород кровли и почвы принято: объемный вес 0,02 МН/м³; модуль объемного сжатия 2220 МПа; модуль сдвига 741 МПа. Для пород, слагающих междукамерный целик: объемный вес пород 0,02 МН/м³; модуль объемного сжатия 2220 МПа; модуль сдвига 741 МПа; сцепление (предел прочности на чистый сдвиг) 5 МПа; предел прочности на одноосное растяжение 1 МПа; угол внутреннего трения 30°.

Величина пластических деформаций, %	0	3	4	5	100
Сцепление, МПа	5	4,25	3	1	1 (остаточная прочность)
Угол внутреннего трения, °	30	28	25	20	20 (остаточная прочность)

Зависимость прочностных свойств целлика от величины реализованных в нем пластических деформаций описывается следующими значениями (см. таблицу).

Перечисленные геометрические параметры и свойства материалов использовались в качестве исходных данных для построения компьютерной модели в программном комплексе FLAC 2D. Было построено несколько моделей, в которых варьировался тип закладочного материала (без закладки; сыпучая закладка; гидравлическая закладка) и степень закладки камер (0%; 50%; 60%; 70%; 80%; 90%; 100%).

В результате компьютерного моделирования были получены параметры распределения деформаций и напряжений в системе «междукамерный целлик — закладочный массив — вмещающие породы» при разной степени заполнения очистных камер закладочным материалом.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 (см. Приложение, с. 99) показаны диаграммы деформирования междукамерного целлика при разной степени закладки смежных с ним очистных камер сыпучим закладочным материалом на основе разрушенного галита и гидрозакладочным материалом на основе солеотходов.

Согласно полученным данным, на первом этапе нагружения в целике развиваются упругие деформации (линейное возрастание зависимости «напряжения-деформации»). После достижения предела пластичности ~18,5 МПа начинается развитие пластических деформа-

ций, зависимость между напряжениями и деформациями становится нелинейной.

Несущая способность целлика (предельные напряжения, которые он может выдержать, или «условно-мгновенная прочность») при принятых исходных данных ~25,1 МПа (см. кривую для степени закладки 0%). Деформации разрушения при этом равны ~0,02.

После начала процесса разрушения несущая способность целлика достаточно резко снижается и останавливается на уровне остаточной прочности ~5 МПа (20% от «условно-мгновенной прочности»).

Характер и количественные параметры полученной диаграммы деформирования МКЦ удовлетворительно совпадают с результатами лабораторных испытаний образцов соляных пород, которые приведены, например, в работах [21 – 23].

Внесение сухого сыпучего закладочного массива в смежные камеры при коэффициенте закладки менее 100% не оказывает влияния на условно-мгновенную несущую способность целлика. Другими словами, единственным способом увеличить предельную несущую способность МКЦ с помощью сухого сыпучего закладочного массива является стопроцентная закладка камер, что в реальных условиях отработки, конечно же, невозможно.

Отсутствие влияния сыпучего закладочного массива на несущую способность целлика в компьютерной модели связано с высокой податливостью сыпучего массива, а также с тем, что на первых этапах деформирования он практически не создает отпора. Междукамерный це-

лик постепенно раздавливается горным давлением, при этом расширяется в стороны, но не встречает необходимого уровня «сопротивления» от закладки.

Внесение же гидравлического твердеющего закладочного материала в смежные камеры позволяет за счет его большей жесткости, чем у сыпучего материала, повысить несущую способность МКЦ даже при закладке камер только на 50% высоты. Увеличение «условно-мгновенной прочности» МКЦ за счет укрепления его стенок гидравлическим массивом в диапазоне степени закладки камер начинает проявляться при коэффициенте закладки 50% и составляет при этом порядка 10% от прочности МКЦ без закладки камер. При коэффициенте закладки 90% «условно-мгновенная прочность» МКЦ увеличивается на 35% от прочности МКЦ без закладки камер.

Теоретически прочность МКЦ может быть «бесконечной», если закладка камер выполнена на 100% (см. график при степени гидравлической закладки 100% на рис. 3).

В качестве иллюстрации к описанным процессам на рис. 4–6 (см. Приложение, с. 99–101) представлен качественный характер деформирования МКЦ без закладки и с закладкой на 60%. Как видно из сравнения рисунков, характер деформирования целика без закладки и с сыпучей закладкой не меняется (форма целика в обоих случаях близка к прямоугольной с выпуклыми боками), в то время как гидравлический закладочный массив заметно влияет на процесс деформирования МКЦ (форма целика близка к трапециевидной), сдерживая его расширение в стороны и тем самым создавая боковой отпор уже на первых этапах деформирования МКЦ даже при относительно небольших степенях закладки камер.

Из приведенных на рис. 3 графиков видно, что в запредельной области де-

формирования МКЦ при определенном уровне деформаций, зависящем от степени закладки камер, начинает резко возрастать сопротивляемость целика дальнейшим деформациям. Это событие соответствует моменту, при котором закладочный массив начинает «работать», т.е. создавать отпор расширяющемуся целику. Для случая сыпучего массива этот момент наступает, как правило, когда закладочный массив соприкасается с кровлей в результате ее опускания и встречного выдавливания вверх закладочного массива (см. рис. 7). В этот момент в нем начинается интенсивное уплотнение и соответствующее ему возрастание сил отпора, показанное кривой на рис. 3.

Для гидравлического массива благодаря его повышенной жесткости и прочности данный момент наступает раньше. К примеру, при степени закладки 80% сухой сыпучий закладочный массив начал создавать отпор при вертикальных деформациях целика 0,092 (или 46 см в абсолютном выражении), а гидравлический твердеющий массив — при деформациях 0,068 (или 34 см). При степени закладки 50% «работу» сыпучего массива не удалось зарегистрировать в модели, т.к. геометрия элементов в результате деформирования была настолько сильно нарушена, что были превышены ограничения применяемого программного пакета. Гидравлический массив же при степени закладки 50% начал создавать отпор при вертикальных деформациях МКЦ 0,16 (80 см).

Полученные диаграммы деформирования МКЦ позволяют ориентировочно оценить величину оседаний вышележащих слоев, которая, если допустить условие совместного оседания слоев без расслоений, будет равна вертикальному сокращению МКЦ.

К примеру, давление, приходящееся на целик в моделируемых условиях (раз-

рабатывается один пласт, мощность $m = 5$ м, ширина МКЦ $b = 5$ м, ширина камер $a = 5$ м, объемный вес $\gamma = 0,02$ МН/м³) на глубине залегания пласта $H = 1000$ м составит $P = \gamma H(a + b)/b = 40$ МПа. Данный уровень напряжений отмечен на рис. 3 штрихпунктирной линией. Из рис. 3 видно, что для ограничения деформаций вышележащей толщи, к примеру, на уровне 10% от вынимаемой мощности (0,5 м), степени закладки камер должны составлять порядка 75% для гидравлического материала, и ~90% для сыпучего материала.

Заключение

Положительный геомеханический эффект от ведения закладочных работ при камерной системе разработки достигается за счет трех факторов:

- исключения вывалообразований из стенок междукамерных целиков и снижения интенсивности отслаивания и отшелушивания их краевых частей;
- создания сил отпора поперечным деформациям междукамерных целиков (реактивное давление) при их «расползании» в стороны в результате воздействия опорного давления;
- принятия части веса от пород кровли, опускающихся со временем на закладочный массив.

Полученные результаты моделирования позволяют судить о том, что с ростом коэффициента закладки устойчивость МКЦ повышается, а величина оседаний снижается. При этом прослеживаемая зависимость между коэффициентом закладки и величиной продольных деформаций МКЦ, близкая к линейной. Во всех смоделированных случаях закладочный массив начина-

ет оказывать значимое сопротивление поперечному деформированию МКЦ только после перехода его в стадию предельного деформирования.

Сдерживающее воздействие сухой закладки в запредельной области деформирования МКЦ начинает проявляться с коэффициентов закладки 60% и более, а гидравлической — начиная с 50%. Момент включения «в работу» сыпучего закладочного массива соответствует моменту посадки на него кровли; гидрозакладочный массив за счет его большей жесткости включается «в работу» раньше.

В компьютерных моделях удалось зафиксировать положительный эффект от закладочных работ, заключающийся в повышении несущей способности междукамерных целиков. При этом, однако, увеличение прочности МКЦ при применении сыпучего закладочного массива из разрушенного непресованного галита достаточно мало (до 5%) даже при высоких степенях закладки. Видимый прирост условно-мгновенной прочности МКЦ достигается при применении гидравлического закладочного массива на основе солеотходов, который в диапазоне степени закладки камер 50—90% составляет порядка 10—35% от прочности МКЦ без закладки камер.

В целом, следует считать целесообразным вопрос о научной проработке возможности учета укрепляющего действия закладочных массивов при расчете степени нагружения МКЦ в нормативно-технической документации на перспективных калийно-магниевых и соляных месторождениях РФ, что может позволить создать условия для повышения коэффициента извлечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубов В. П.* Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 77—83.

2. *Poborska-Młynarska K.* Katastrofy wodne w górnictwie solnym na świecie — przyczyny, sposoby zwalczania, skutki // *Przegląd Górniczy*. 2018. Vol. 74. No 6. Pp. 33–41.
3. *Minkley W., Muhlbauer J., Ludeling C.* Dimensioning principles in potash and salt: stability and integrity // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49. No 11. Pp. 4537–4555.
4. *Rauche H.* Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 580 p.
5. *Zschiedrich K., Pietsch T., Kuyumcu M.* Bewältigung von technischen, ökologischen und sozialen herausforderungen bei der stilllegung kalibergwerken in Ostdeutschland // *Mining Report Glückauf*. 2017. No 3. P. 539–252.
6. *Wagner H.* Die rolle von versatz im bergbau // *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2009. Vol. 154. No 2. P. 52–59.
7. *Fliß T., Marx H., Thona H.* Backfilling and pillar re-mining in potash industry / MINE-FILL 2011 – International Conference on Mining with Backfill, 21–25 March 2011 Cape Town South Africa, available at: www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/GMB/Dokumente/paper_kutec_minefill_en.pdf.
8. *Garrett D. E.* Potash deposits, processing, properties and uses. London: Chapman & Hall, 1996. 734 p.
9. *Snyman B. J.* Boulby mine backfill system / *Paste tailings management*, ed. by Erol Yilmaz and Mamadou Fall. Springer, 2017. P. 303.
10. *Гилев М. В., Константинова С. А., Мураков В. Е., Чернопазов С. А.* Закладка выработанного пространства при разработке сильвинитовых пластов как конструктивный элемент системы разработки // *Маркшейдерский вестник*. — 2007. — № 1. — С. 33–40.
11. *Борзаковский Б. А., Папулов Л. М.* Закладочные работы на Верхнекамских калийных рудниках. Справочник. — М.: Недра, 1994. — 234 с.
12. *Лобанов С. Ю., Шумихина А. Ю.* О влиянии свойств закладки на несущую способность междукамерных целиков // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2011. — № 4. — С. 24–27.
13. *FLAC.* Explicit continuum modeling of non-linear material behavior in 2D. ITASCA Consulting Group, Inc. <https://www.iteascacg.com/software/flac>.
14. *FLAC and numerical modeling in geomechanics: proceedings of the 4th International «FLAC» Symposium, 29–31 May 2006, Madrid, Spain.* 2006. 474 p.
15. *Sambeek L. L. V.* Testing and modeling of backfill used in salt and potash mines / *Rock Support in Mining and Underground Construction. Proceedings of the International Symposium on Rock Support, Sudbury, Ontario, Canada, 16–19 June 1992.* Pp. 583–589.
16. *Дешковский В. Н., Новокшенов 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. 77–74.
17. *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, Пермь, ПГТУ, Россия, 29–31 октября 2008 г.* — Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. — С. 56–63.
18. *Yan B.* Application of double-yield model in numerical simulation of stability of mining filling body // *Arabian Journal of Geosciences*. 2019. No 12. Article 515.
19. *Константинова С. А., Чернопазов С. А., Асанов В. А.* Математическая модель состояния закладочного массива на Верхнекамском месторождении калийных солей // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. — 2010. — № 1. — С. 44–49.

20. Вотяков М. В. Повышение полноты извлечения запасов калийных руд на основе закладки выработанного пространства галитовыми отходами: Автореферат канд. тех. наук. — М., 2009. — 24 с.

21. Барях А. А., Константинова С. А., Асанов В. А. Деформирование соляных пород. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996.

22. Барях А. А., Асанов В. А., Паньков И. Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского месторождения: учебное пособие. — Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. — 199 с.

23. Константинова С. А., Аптуков В. Н. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. — Новосибирск: Наука, 2013. — 192 с. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Zubov V. P. Applied technologies and current problems of resource conservation in underground mining of stratified mineral deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no 6, pp. 77 – 83. [In Russ].

2. Poborska-Młynarska K. Katastrofy wodne w górnictwie solnym na świecie – przyczyny, sposoby zwalczania, skutki. *Przegląd Górniczy*. 2018. Vol. 74. No 6. Pp. 33 – 41.

3. Minkley W., Muhlbauer J., Ludeling C. Dimensioning principles in potash and salt: stability and integrity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016. Vol. 49. No 11. Pp. 4537 – 4555.

4. Rauche H. *Die Kaliindustrie im 21. Jahrhundert*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015. 580 p.

5. Zschiedrich K., Pietsch T., Kuyumcu M. Bewältigung von technischen, ökologischen und sozialen herausforderungen bei der stilllegung kalibergwerken in Ostdeutschland. *Mining Report Glückauf*. 2017. No 3. P. 539 – 252.

6. Wagner H. Die rolle von versatz im bergbau. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2009. Vol. 154. No 2. P. 52 – 59.

7. 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, available at: www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/GMB/Dokumente/paper_kutec_minefill_en.pdf.

8. Garrett D. E. *Potash deposits, processing, properties and uses*. London: Chapman & Hall, 1996. 734 p.

9. Snyman B. J. Boulby mine backfill system. *Paste tailings management*, ed. by Erol Yilmaz and Mamadou Fall. Springer, 2017. P. 303.

10. Gilev M. V., Konstantinova S. A., Murakov V. E., Chernopazov S. A. Backfill of mine goaf during the development of sylvinitic layers as a structural element of the development system. *Marksheyderskiy vestnik*. 2007, no 1, pp. 33 – 40. [In Russ].

11. Borzakovskiy B. A., Papulov L. M. *Zakladochnye raboty na Verkhnekamskikh kaliyinykh rudnikakh*. Spravochnik [Backfill at the Verkhnekamsk potash mines. Handbook], Moscow, Nedra, 1994, 234 p.

12. Lobanov S. Yu., Shumikhina A. Yu. On the effect of backfill properties on the bearing capacity of interchamber pillars. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no 4, pp. 24 – 27. [In Russ].

13. *FLAC. Explicit continuum modeling of non-linear material behavior in 2D*. ITASCA Consulting Group, Inc. <https://www.itascag.com/software/flac>.

14. *FLAC and numerical modeling in geomechanics: proceedings of the 4th International «FLAC» Symposium*, 29 – 31 May 2006, Madrid, Spain. 2006. 474 p.

15. Sambeek L. L. V. Testing and modeling of backfill used in salt and potash mines. *Rock Support in Mining and Underground Construction. Proceedings of the International Symposium on Rock Support*, Sudbury, Ontario, Canada, 16 – 19 June 1992. Pp. 583 – 589.

16. Deshkovskiy V. N., Novokshonov V. N., Palto P. P. Development of a methodology for calculating the propagation height of the zone of water-conducting cracks for longwall method

with a partial backfill of mine goaf in the form of rock walls. *Gornaya mekhanika*. 2007, no 2, pp. 77–74. [In Russ].

17. Shvab R. G., Deshkovskiy V. N. Management of the state of the undermined rock mass by partial backfill of mine goaf in the form of rock walls from destroyed halite during extraction of potash ore reserves by a longwall method. *Problemy ratsional'nogo prirodopol'zovaniya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Perm, PGU, Rossiya, 29–31 oktyabrya 2008 g. [Problems of environmental management: materials of the international scientific and practical conference, Perm, PGU, Russia, October 29–31, 2008], Perm, Izd-vo PGU, 2008, pp. 56–63. [In Russ].

18. Yan B. Application of double-yield model in numerical simulation of stability of mining filling body. *Arabian Journal of Geosciences*. 2019. No 12. Article 515.

19. Konstantinova S. A., Chernopazov S. A., Asanov V. A. A mathematical model of the state of the filling mass at the Verkhnekamsk deposit of potash salts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2010, no 1, pp. 44–49. [In Russ].

20. Vot'yakov M. V. *Povyshenie polnoty izvlecheniya zapasov kaliynykh rud na osnove zakladki vyrabotannogo prostranstva galitovymi otkhodami* [Increasing the completeness of the extraction of potash ore reserves based on the backfill of mine goaf with halite waste], Candidate's thesis, Moscow, 2009, 24 p.

21. Baryakh A. A., Konstantinova S. A., Asanov V. A. *Deformirovanie solyanykh porod* [Salt deformation], Ekaterinburg, UrO RAN, 1996.

22. Baryakh A. A., Asanov V. A., Pan'kov I. L. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva solyanykh porod Verkhnekamskogo mestorozhdeniya: uchebnoe posobie* [Physico-mechanical properties of salt rocks of the Verkhnekamsk field: Educational aid], Perm, Izd-vo PGU, 2008, 199 p.

23. Konstantinova S. A., Aptukov V. N. *Nekotorye zadachi mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya solyanykh porod* [Some problems of the mechanics of deformation and destruction of salt rocks], Novosibirsk, Nauka, 2013, 192 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ковальский Евгений Ростиславович*¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: e.r.kovalsky@gmail.com,

*Громцев Кирилл Владимирович*¹ — аспирант,
e-mail: kirillgromcev@mail.ru,

*Петров Дмитрий Николаевич*¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: petrovgs@mail.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Громцев К.В., e-mail: kirillgromcev@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.R. Kovalski*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: e.r.kovalsky@gmail.com,

*K.V. Gromtsev*¹, Graduate Student,
e-mail: kirillgromcev@mail.ru,

*D.N. Petrov*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: petrovgs@mail.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia

Corresponding author: K.V. Gromtsev, e-mail: kirillgromcev@mail.ru.

Получена редакцией 20.11.2019; получена после рецензии 06.05.2020; принята к печати 20.08.2020.

Received by the editors 20.11.2019; received after the review 06.05.2020; accepted for printing 20.08.2020.

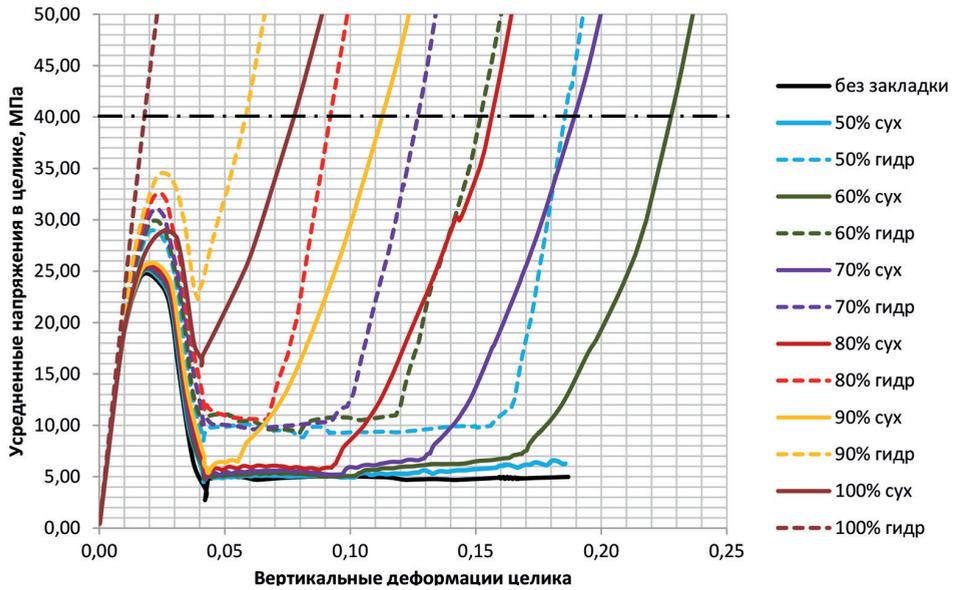


Рис. 3. Диаграммы нагружения-деформирования междукамерного целика в зависимости от степени закладки смежных с ним камер для случая применения сухой закладки из разрушенного галита и гидравлической закладки из солеотходов

Fig. 3. Stress-strain curves for rib pillar at different degrees of filling of adjacent stopes with dry backfill made of crushed halite and with hydraulic backfill made of waste salt rock

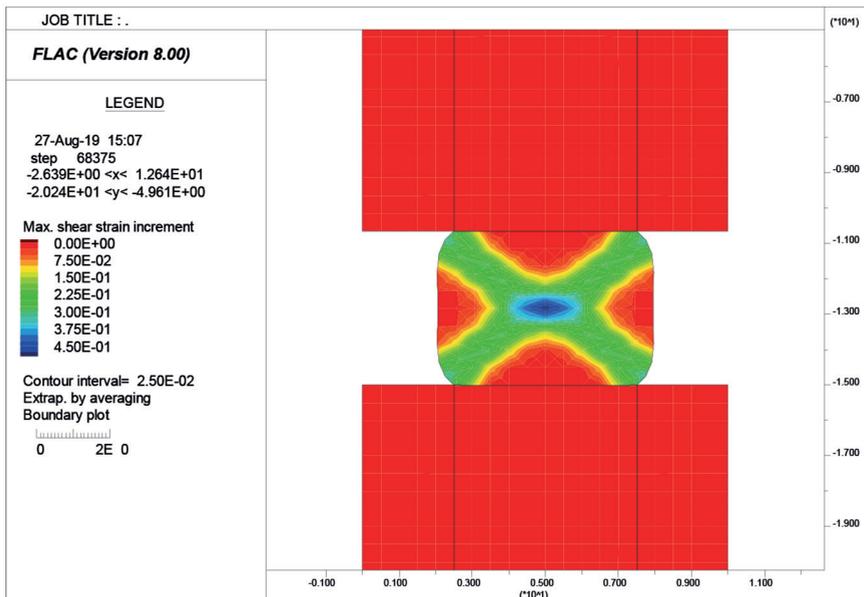


Рис. 4. Интенсивность сдвиговых деформаций в междукамерном целике при отсутствии закладки смежных с ним очистных камер

Fig. 4. Shear strain rates in rib pillar without backfill in adjacent stopes

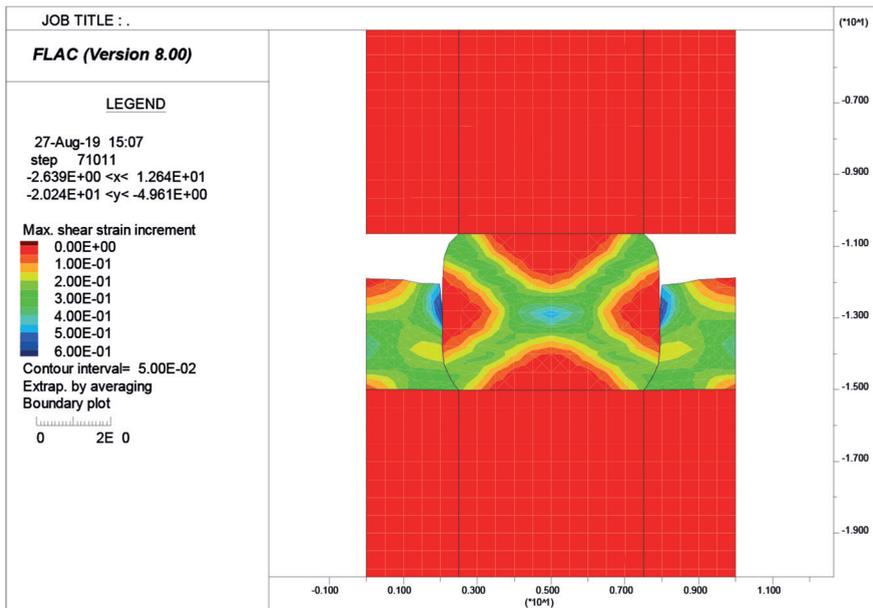


Рис. 5. Интенсивность сдвиговых деформаций в междукамерном целике при закладке смежных с ним очистных камер сыпучим закладочным материалом (степень закладки 60%)

Fig. 5. Shear strain rates in rib pillar with loose backfill in adjacent stopes (degree of filling 60%)

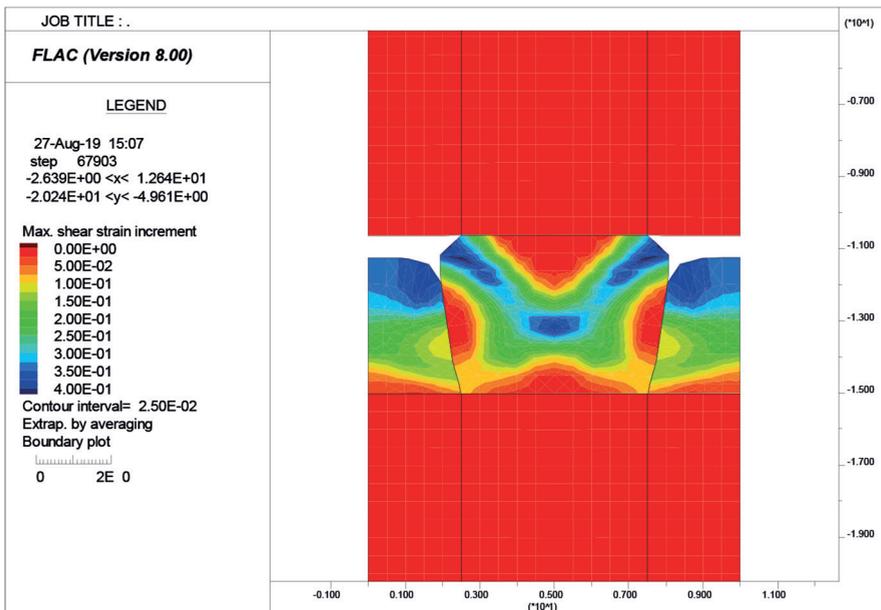


Рис. 6. Интенсивность сдвиговых деформаций в междукамерном целике при закладке смежных с ним очистных камер гидравлическим закладочным материалом (степень закладки 60%)

Fig. 6. Shear strain rates in rib pillar with hydraulic backfill in adjacent stopes (degree of filling 60%)

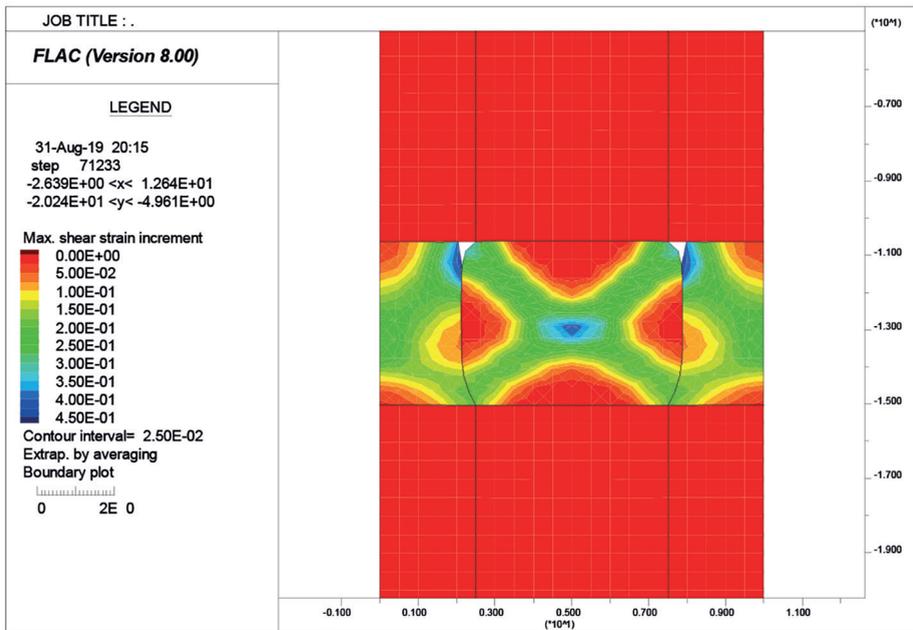
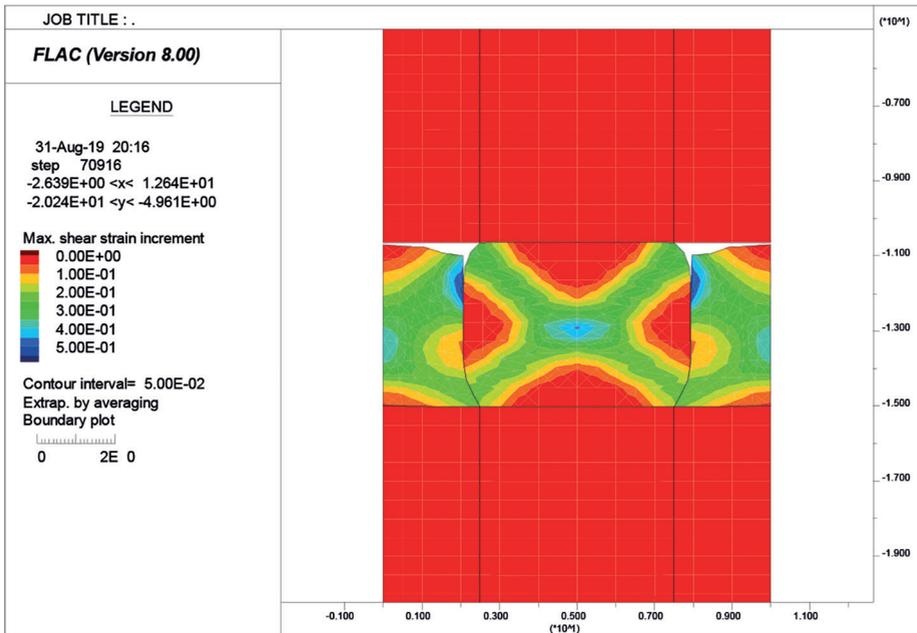


Рис. 7. Иллюстрация к моменту начала «работы» сыпучего закладочного массива (вверху — имеется зазор между закладочным массивом и кровлей, и закладочный массив создает лишь малый отпор; внизу — кровля и закладочный массив в результате деформирования соприкоснулись, и закладочный массив начал создавать существенный отпор)

Fig. 7. Illustration of engagement of loose backfill (top: there is a gap between backfill and roof, and backfill only creates a weak reaction pressure; bottom: backfill and roof come in contact as a result of deformation, and backfill generates essential reaction pressure)