

УДК 622.831

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВТОРНОЙ ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ КАЛИЙНЫХ РУД

А. А. Барях, Н. Л. Бельтюков, Н. А. Самоделкина, В. Н. Токсаров

*Горный институт УрО РАН, E-mail: bar@mi-perm.ru,
ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Рассмотрена возможность повторной отработки запасов природно-техногенного сильвинитового пласта КрII* для условий Верхнекамского месторождения калийных солей. Проведены натурные испытания крупномасштабных образцов, установлены механические свойства пород пласта КрII*. Для оценки степени нагружения неоднородных междукамерных целиков, оставляемых при повторной отработке запасов, использованы методы математического моделирования. Предложены несколько вариантов технологических схем повторной отработки природно-техногенного пласта КрII*, обеспечивающих приемлемые технико-экономические показатели и безопасные условия ведения горных работ.

Междукамерные целики, очистные камеры, природно-техногенный пласт, повторная отработка, натурные испытания, степень нагружения, математическое моделирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20200309

В мировой практике горного дела повторная отработка встречается в основном на рудных месторождениях и представляет собой полную или частичную выемку междукамерных целиков, оставленных после первой стадии извлечения запасов камерно-столбовой системой разработки [1–3]. Принципиально данная технология отработки, или двухстадийная выемка, может применяться и на месторождениях калийных солей, в частности на крупнейшем разрабатываемом в России Верхнекамском месторождении [4–8].

Особенность разработки таких месторождений связана с необходимостью обеспечения сохранности водозащитной толщи пород, отделяющей выработанное пространство рудника от водоносных горизонтов. На первой стадии отработка продуктивных пластов проводится с оставлением широких “жестких” междукамерных целиков. Далее после закладки очистных камер выполняется частичная выемка междукамерных целиков. Однако на калийных месторождениях широкого распространения камерно-столбовая система разработки с двухстадийной выемкой не получила. Это обусловлено как экономическими, так и совокупностью технологических факторов: минимизация сроков отставания закладочных работ от очистных, плохое состояние подготовительных выработок после отработки первой стадии и т. д. [4].

Для повышения извлечения запасов на отдельных участках Верхнекамского месторождения применялись параметры системы отработки, при которых деформирование междукамерных целиков осуществлялось в “податливом” режиме (рис. 1). Срок службы целиков в этом случае не превышал 1.5–2.0 года [9], после чего происходила полная потеря их устойчивости. За счет контроля скорости подвигания фронта очистных работ достигалось плавное оседание водозащитной толщи пород без нарушения ее сплошности.

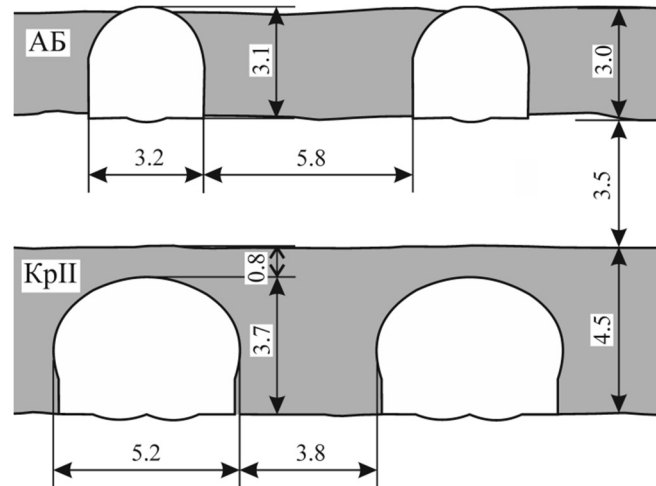


Рис. 1. Варианты параметров очистной выемки (в метрах) сильвинитовых пластов АБ и КрII с оставлением “податливых” целиков на пласте КрII (рудник БКПРУ-2)

Вскрытие двумя экспериментальными выработками участка, отработанного ранее с оставлением “податливых” целиков, на Втором Березниковском руднике (БКПРУ-2) показало, что очистные камеры на пласте АБ частично, а на пласте КрII полностью погашены вследствие деформирования податливых целиков и заполнения камер вмещающими породами. Можно считать, что образовался непрерывный природно-техногенный пласт, имеющий существенно меньшую мощность и периодически изменяющиеся механические свойства (рис. 2). Формирование вторичного природно-техногенного пласта КрII* с достаточной вынимаемой мощностью и прочностными свойствами создает предпосылки для его отработки.

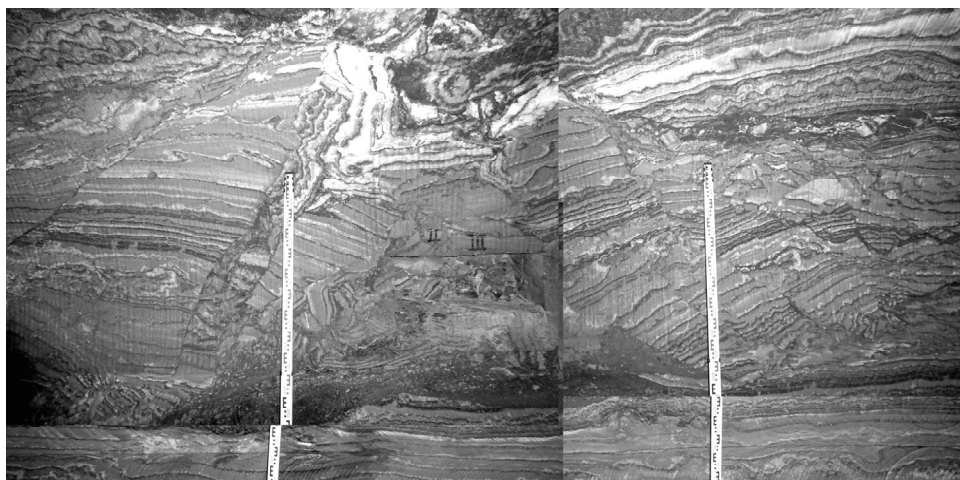


Рис. 2. Камера на природно-техногенном пласте КрII*, заполненная материалом примыкающих целиков и обрушенной кровли

В результате образования природно-техногенного пласта КрII* речь идет уже не о двухстадийной его выемке, а о повторной отработке запасов месторождения. Данная задача является уникальной для горной практики. Ее реализация позволит увеличить извлечение полезных ископаемых, продлить срок службы калийных предприятий без крупных капитальных затрат на разведку и подготовку новых участков месторождения. Однако внедрение повторной выемки сильвинитовой руды невозможно без проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований, выполнения опытно-промышленных работ и организации систем контроля состояния несущих элементов.

СТРУКТУРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОМ ПЛАСТЕ КрII*

Первичная отработка запасов на вскрытом участке рудника БКПРУ-2 проводилась в 1971 г. комбайнами “Караганда-7/15” по пласту КрII и “ПК-8” по пласту АБ (рис. 1). Расстояние от кровли до земной поверхности составляло 365 м для пласта КрII и около 360 м для пласта АБ. Параметры системы разработки, принятые по пласту КрII: ширина камер — 5.2 м, ширина целиков — 3.8 м; по пласту АБ — 3.2 и 5.8 м соответственно. Камеры и целики на указанных пластах располагались соосно. Мощность пластов АБ и КрII составляла 3.0 и 4.5 м, вынимаемая мощность — 3.1 и 3.7 м соответственно. Оработка пласта КрII велась с оставлением в кровле защитной сильвинитовой пачки мощностью 0.70–0.85 м. Мощность междупластья КрII–АБ 3.5 м. Деформирование целиков пласта КрII происходило в “податливом” режиме, тогда как целиков пласта АБ — в относительно жестком. Это обусловлено большей нагрузкой, приходящейся на целики пласта КрII, и меньшей их несущей способностью, связанной с коэффициентом формы.

Вскрытие отработанного участка двумя экспериментальными выработками по пластам АБ и КрII и детальное обследование их стенок показало, что очистные камеры на пласте КрII фактически полностью погашены (рис. 2). На пласте АБ, где очистные работы велись с оставлением относительно жестких целиков, процесс их деформирования продолжается, а камеры лишь частично заполнены вмещающими породами.

В результате структурно-геологических наблюдений установлено, что образующийся вторичный природно-техногенный пласт КрII* является сплошным и имеет практически постоянную выемочную мощность 2.8–3.2 м. Маркшейдерские замеры показали, что к концу срока формирования пласта КрII* оседание земной поверхности над отработанным участком составило около 1.5 м. Оседание обусловлено в основном деформацией “податливых” междукamerных целиков пласта КрII, тогда как мощность пласта АБ* практически не изменилась и равна 2.8–3.0 м.

Площадь поперечного сечения камер на пласте КрII* значительно уменьшилась в связи с поперечной деформацией междукamerных целиков. Камеры приняли форму, близкую к трапециевидной, с основанием 3–4 м, лежащим на почве пласта. Так как межосевое расстояние при отработке пласта КрII — 9 м, то ширина деформированных целиков составляет 5–6 м (рис. 3).

Рудосодержащий массив пласта АБ* претерпел незначительные трансформации. Ширина камер практически не изменилась и равна 2.8–3.2 м, что при межосевом расстоянии 9 м дает ширину рудосодержащего массива между ними 5.8–6.2 м.

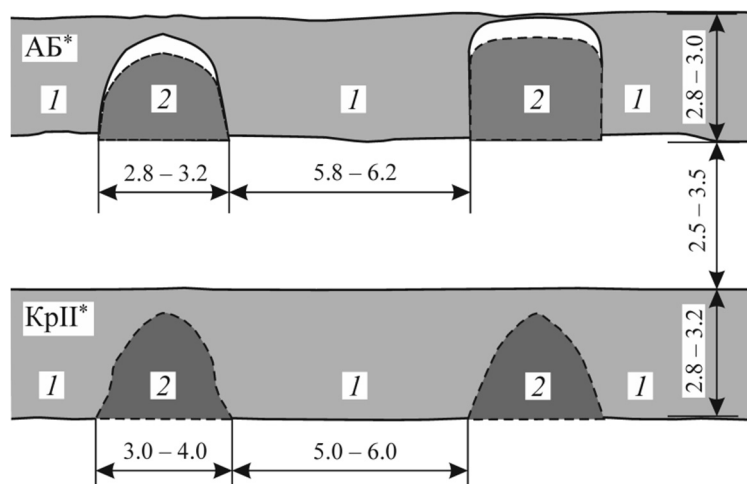


Рис. 3. Схематическое представление природно-техногенных пластов АБ* и КрП*: 1 — рудосодержащий массив; 2 — забутованная камера

Формирование природно-техногенных пластов АБ* и КрП* происходит в разные, существенно отличающиеся друг от друга, сроки. В настоящее время потенциально пригоден для выемки запасов только пласт КрП*. Отработка запасов пласта АБ*, по-видимому, будет возможна лишь к завершению процесса сдвижения.

ВОЗМОЖНЫЕ ВАРИАНТЫ ПОВТОРНОЙ ОТРАБОТКИ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОГО ПЛАСТА КрП*

В связи с тем, что сформированный природно-техногенный пласт КрП* имеет практически постоянную выемочную мощность около 3 м и его строение осложнено наличием глинистых прослоев в кровле, отрабатывать его целесообразно комбайнами малого сечения — типа “Урал-61”. Данный комбайн имеет ширину хода 3.2 м, высоту хода 3.1 м и дает округлую форму сечения (8.7 м^2), что обеспечивает более устойчивое состояние кровли камер по сравнению с другими типами комбайнов, применяемых на Верхнекамском месторождении. С целью обеспечения постоянства качества добываемой руды и равномерного распределения нагрузки в вышележащей толще пород межосевое расстояние при повторной отработке целесообразно принять равным первичному значению 9 м. Тогда в зависимости от положения осей вторичных камер можно предложить следующие варианты повторного извлечения запасов природно-техногенного пласта КрП*:

- отработка целиков, оставленных при первичной выемке запасов, с межосевым расстоянием 9 м (рис. 4а);
- отработка забутованных камер с межосевым расстоянием 9 м (рис. 4б);
- отработка целиков, оставленных при первичной выемке запасов, с межосевым расстоянием 18 м (рис. 4в);
- отработка забутованных камер с межосевым расстоянием 18 м (рис. 4г).

Выбор наиболее оптимального варианта отработки пласта КрП* должен основываться на требованиях действующего нормативного документа [9], который регламентирует степень нагружения междукamerных целиков $C \leq 0.4$. Определение данного параметра базируется на методике Турнера–Шевякова [10, 11], модифицированной с учетом результатов, выполненных на Верхнекамском месторождении экспериментальных исследований. Степень нагружения целиков равна отношению нагрузки Q , действующей на целики, к их несущей способности P : $C = Q / P$.

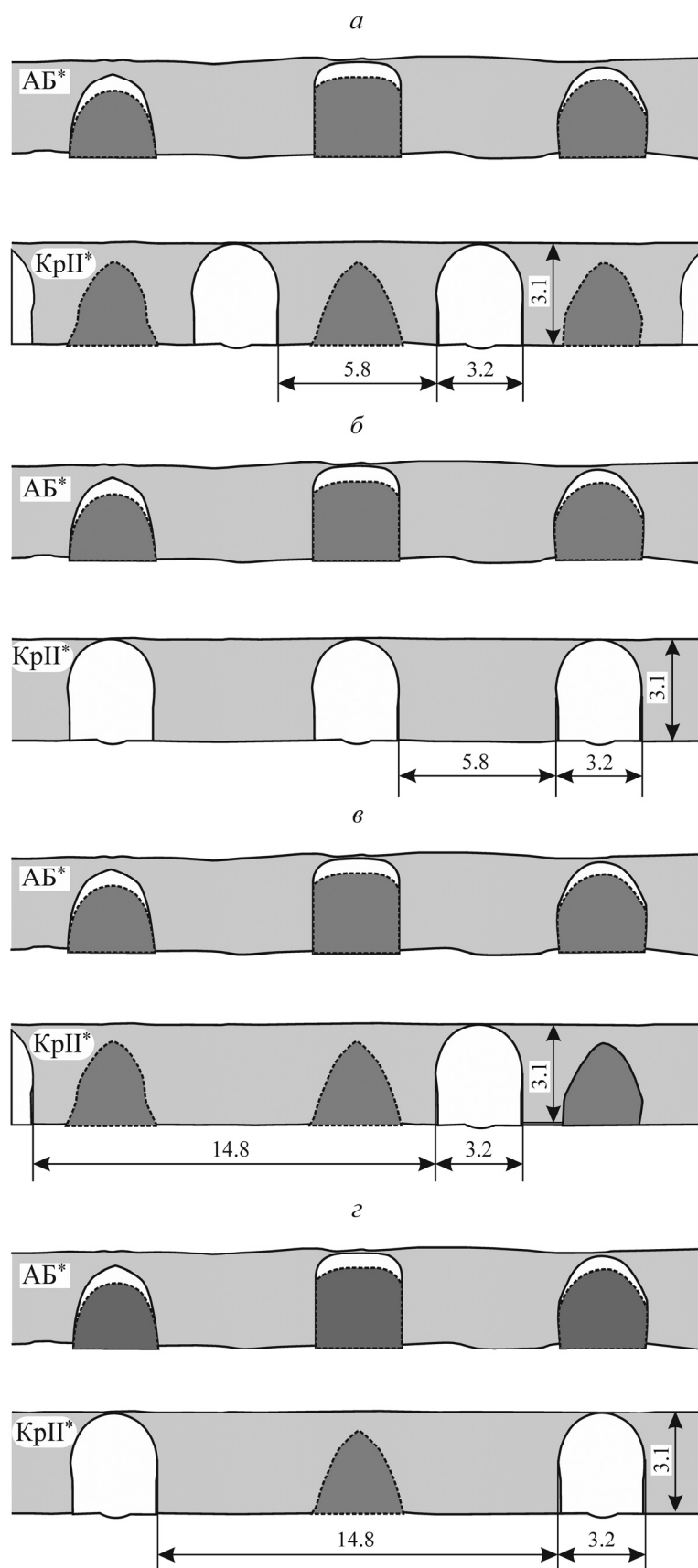


Рис. 4. Варианты повторной отработки природно-техногенного пласта КрII*

Для междукammerного целика, находящегося в зоне полной подработки, нагрузка на него Q полностью обусловлена весом толщи вышележащих пород:

$$Q = \frac{\gamma H_0 l}{b},$$

где $\gamma = 2.2 \text{ тс/м}^3$ — объемный вес налегающей толщи пород; H_0 — расстояние от земной поверхности до кровли целиков; l — межосевое расстояние; b — расчетная ширина междукammerных целиков.

Несущая способность целиков P определяется агрегатной прочностью пород в массиве σ_m :

$$P = k_f \sigma_m,$$

k_f — коэффициент, учитывающий форму целиков (характеризуется отношением ширины целика b к его высоте m).

Для целиков Верхнекамского месторождения с отношением $b/m > 0.5$ коэффициент формы находится с помощью выражения [9]:

$$k_f = 0.654 \left(1 + 1.06 \frac{b}{m} \right).$$

Агрегатная прочность пород рассчитывается по формуле

$$\sigma_m = k_m k_c k_l \sigma_0,$$

здесь k_m — коэффициент, учитывающий влияние масштабного фактора; k_c — коэффициент, учитывающий влияние глинистых прослоек; k_l — коэффициент, учитывающий влияние прорезки целиков; σ_0 — эквивалентная (приведенная) прочность пород, слагающих целики.

Для оценки несущей способности P междукammerных целиков, оставляемых при повторной отработке, необходима достоверная информация о прочностных свойствах пород природно-техногенного пласта КрП*.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОГО ПЛАСТА КрП*

С целью определения механических свойств пород природно-техногенного пласта КрП* с отработанного участка рудника БКПРУ-2 взяты пробы, из которых изготовлены образцы для лабораторных исследований. Испытания показали явно завышенные значения механических свойств пород разрушенных целиков, почти не отличающиеся от исходных свойств природного пласта КрП. В этой связи проведены натурные испытания на одноосное сжатие крупномасштабных породных призм, отделенных от приконтурного массива.

Суть данного метода заключается в оконтуривании породных призм размером $40 \times 20 \times 20$ см с пяти сторон от массива и их нагружении гидроцилиндром до полного разрушения с одновременной регистрацией гидравлического давления и продольной деформации блока (рис. 5). По результатам испытаний призм на одноосное сжатие построены диаграммы деформирования — зависимости осевого напряжения от продольной деформации. Предел прочности образца определяется по максимальному гидравлическому давлению, зарегистрированному в процессе нагружения, с учетом площадей поперечного сечения штока и образца.

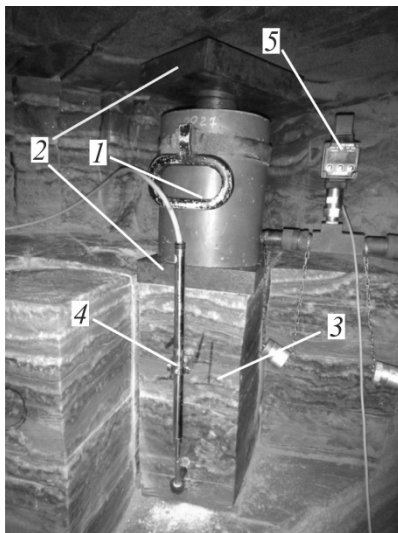


Рис. 5. Схема испытаний на одноосное сжатие призм соляных пород в натуральных условиях с использованием гидроцилиндра: 1 — гидроцилиндр; 2 — опорные плиты; 3 — испытуемый породный блок; 4 — потенциометрический датчик продольной деформации; 5 — электронный датчик давления

Испытания механических свойств пород природно-техногенного пласта КрП* в натуральных условиях выполнялись в экспериментальной выработке, пройденной в отработанной зоне шахтного поля рудника БКПРУ-2. В стенке выработки с восточной стороны оконтурены и испытаны 26 породных призм: 13 — в забутовке камеры; 13 — в междукammerном целике.

В результате натуральных испытаний установлено, что форма диаграмм деформирования породных призм аналогична зависимостям, получаемым при лабораторных испытаниях соляных пород. Крупномасштабные образцы имеют ярко выраженные пластические свойства. Переход пород из квазиупругой в пластическую стадию деформирования происходит при нагрузках 40–50 % от предела прочности. За пределом прочности отмечается плавный спад нагрузки с выходом на остаточную прочность, значение которой составляет около 70 % от $\sigma_{сж}$. Стадия разгрузки показывает, что образцы почти не восстанавливают свою форму после снятия нагрузки, а доля упругих деформаций незначительна.

Для призм, изготовленных из забутовки камеры, характерна значительная вариация предела прочности от 0.3 до 8.6 МПа. В среднем $\sigma_{сж}$ составляет 3.4 МПа, что более чем в 5 раз меньше средних значений в нетронутом массиве природного пласта КрП ($\sigma_{сж} = 18.2$ МПа). Наименьшими прочностными показателями обладают блоки, имеющие в своем строении мощный глинистый прослой с незначительными обломками каменной соли, по которому происходит разрушение. Также пониженную прочность показывают блоки, разрушение которых реализуется в виде сдвига по наклонным глинистым прослоям. Наибольшей прочностью обладают образцы, спрессованные из крупных обломков каменной соли и красного сильвинита, с незначительным содержанием глинистого материала. Как правило, они демонстрируют классический характер разрушения с образованием трещин, субпараллельных оси нагружения.

Предел прочности пород, слагающих междукammerный целик, почти равномерно распределен в интервале от 8.1 до 17.9 МПа. Строение некоторых призм осложнено наличием диагональных техногенных трещин. Данные образцы при испытаниях имели наименьшую прочность, а их разрушение реализовалось в виде сдвига по этим трещинам. Характер разрушения остальных блоков имеет классический вид с образованием субвертикальных трещин. Среднее

Результаты натурных испытаний показали значительно более низкие прочностные свойства пород, слагающих целики, по сравнению со значениями, присущими природному массиву пласта КрII. В основном это обусловлено наличием техногенных трещин и сильной нарушенностью междукammerных целиков. Таким образом, при оценке эквивалентной прочности неоднородных междукammerных целиков, оставляемых в процессе повторной отработки пласта КрII*, целесообразно дифференцировать их прочность по ширине: прочность забутовки камер — 3.4 МПа, прочность исходных междукammerных целиков — 12.0 МПа.

Для неоднородных по ширине междукламерных целиков (рис. 4) стандартная инженерная методика расчета степени их нагружения отсутствует ввиду сложности определения эквивалентной прочности. Оценка степени нагружения целиков при повторной отработке природно-генного пласта КрП* проводилась методом математического моделирования.

The diagram illustrates a vertical assembly of components. At the top, a load γH is applied through five downward arrows. The assembly consists of several layers and components labeled as follows from top to bottom:

- Layer **К** (left) and **Е** (right).
- Layer **КС**.
- Layer **К** (left) and **Д** (right), with a downward arrow γ between them.
- Layer **КС**.
- Layer **К** (left) and **Г** (right), with a downward arrow between them.
- Layer **КС**.
- Layer **К** (left) and **В** (right), with a downward arrow between them.
- Layer **КС**.
- Layer **АБ**, containing two semi-circular patterns.
- Layer **КС**.
- Layer **КС**, with a downward arrow on the right side.
- Layer **КС**.
- Layer **КС**.
- Layer **КС**.
- Bottom section **ПдКС**, containing two downward arrows and a coordinate system with y (vertical) and x (horizontal) axes.

Supports are indicated by hatched triangles on the left and right sides, and by triangles with rollers at the bottom. On the right side, labels **КрI**, **КрII**, and **КрIII** are associated with horizontal lines. A label **с** on the left has arrows pointing to the layers **КС** and **АБ**.

Рис. 6. Расчетная схема: к — карналлит; кс — каменная соль; с — сильвинит

Предполагалось, что исходное напряженное состояние породного массива обусловлено действием только гравитационных сил. Вертикальное напряжение σ_y характеризуется весом перекрывающей горизонтально-слоистой толщи горных пород, а горизонтальные составляющие тензора напряжений вычисляются через значения коэффициента бокового распора $\lambda_x = 0.8$. В силу симметрии задачи, принимались равными нулю горизонтальные перемещения на боковых границах $U_x = 0$ и вертикальные — на нижней границе $U_y = 0$. На верхней границе действовала распределенная нагрузка γH (H — расстояние от земной поверхности до верхней границы рассматриваемой области). Принятые в расчетах средние значения физико-механических свойств пород пластов и толщ выделенной части соляного массива приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства пород соляного массива на рассматриваемом участке шахтного поля рудника БКПРУ-2

Пласт, толща		Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	
			на растяжение	на сжатие
Каменная соль пластов В–Г, Г–Д, Е–Д		0.95	1.06	21.5
Карналлит пластов В, Г, Д, Е		0.50	0.56	11.5
Сильвинит пласта АБ		0.70	1.00	19.0
Глина пластов КрI – КрII, АБ – КрI		0.08	0.40	1.2
Каменная соль пласт КрI – КрII	Ненарушенная часть пласта КрI – КрII	1.00	1.10	21.5
	Трещиноватая часть пласта КрI – КрII над камерами	0.65	0.90	17.0
Пласт КрII*	Междукамерный целик	0.65	0.80	12.0
	Забутовка камеры	0.30	0.10	3.4
Каменная соль пластов КрIII, КрI – КрII, АБ – КрI, Б – В		1.00	1.10	21.5
Сильвинит пластов КрIII, КрI		0.70	1.00	23.0
Подстилающая каменная соль ПдКС		1.20	1.15	21.5

Дискретизация исследуемой области на конечные элементы составляла в горизонтальных направлениях 0.10–0.15 м. В вертикальном направлении в зависимости от мощности пластов шаг дискретизации варьировался от 0.25 до 0.40 м, а для глинистых слоев — 0.10–0.15 м.

В результате анализа напряженного состояния природно-техногенного пласта КрII* установлено, что вертикальные напряжения в междукамерном целике близки к весу толщи вышележащих пород, а в забутованных камерах — ниже величины γH ($0.7 - 0.8\gamma H$). На этом основании можно сделать вывод, что полного восстановления естественного поля напряжений в выработанном пространстве пласта КрII* не произошло.

Следующий этап математического моделирования заключался в оценке напряженно-деформированного состояния породного массива в случае повторного извлечения запасов природно-техногенного пласта КрII* при различных технологических схемах отработки. Расчетная схема задачи в целом соответствует приведенной на рис. 6 и отличается лишь наличием вторичных очистных камер на пласте КрII*. В качестве исходного поля напряжений рассматривалось напряженное состояние, сформированное в породном массиве на начало повторной отработки.

Прочностная оценка состояния пород, слагающих междукammerные целики пласта КрII*, выполнялась на основе критерия Кулона–Мора, с использованием параболической огибающей [14], построенной по известным значениям пределов прочности на растяжение $\sigma_{\text{раст}}$ и сжатие $\sigma_{\text{сж}}$. Критерием разрушения в области сжатия являлось выполнение неравенства

$$K = \frac{\tau_{\text{max}}}{\tau_{\text{пр}}} = \frac{\tau_{\text{max}}}{\sqrt{(\sigma_{\text{раст}} + \sigma_n)[2\sigma_{\text{раст}} - 2\sqrt{\sigma_{\text{раст}}(\sigma_{\text{раст}} + \sigma_{\text{сж}}) + \sigma_{\text{сж}}]}} \geq 1.$$

Здесь максимальное касательное τ_{max} и нормальное σ_n напряжения определяются для площадки, ориентированной под углом α к главным осям, на которой данное соотношение достигает наибольшего значения. В области растяжения предельное напряжение ограничивалось пределом прочности на растяжение: $\sigma_1 = \sigma_{\text{раст}}$.

В рамках принятых критериальных условий локализация зон пластических деформаций рассматривалась как нарушение сплошности соляных пород.

Реализация упругопластической задачи в соответствии с методом начальных напряжений осуществлялась следующим образом. Если главные напряжения $\{\sigma^{\text{уп}}\}$ в произвольном конечном элементе, определенные по закону Гука, превышали предельные $\{\sigma^{\text{пр}}\}$, то в рамках итерационной процедуры проводилась их корректировка на величину $\{\Delta\sigma\} = \{\sigma^{\text{уп}}\} - \{\sigma^{\text{пр}}\}$. В дальнейших расчетах $\{\Delta\sigma\}$ принимались в качестве начальных напряжений и на каждой итерации суммировались. Вычислительный процесс завершался, когда все компоненты $\{\Delta\sigma\}$ во всех конечных элементах не превышали некоторую наперед заданную малую величину.

Согласно [15], степень нагружения целика C определяется как значение критериального параметра K , которое соответствует его максимальной величине, действующей по всей ширине или высоте целика. На рис. 7 приведены результаты оценки степени нагружения междукammerных целиков для двух возможных вариантов отработки природно-техногенного пласта КрII*. На представленных иллюстрациях показано распределение критериального параметра K по сечению междукammerного целика. Ниже приведен график изменения степени нагружения целика C в процессе итерационной процедуры решения упругопластической задачи (N — число итераций), который свидетельствует о приемлемой сходимости результатов расчета.

Результаты расчетов степени нагружения целиков методом математического моделирования для всех вариантов повторной отработки сведены в табл. 2. Здесь же по результатам геологических наблюдений показано относительное разубоживание руды $k_{\text{раз}}$ каменной солью и глинистым материалом, составляющими забутовку первичных камер. Данный параметр определяется как отношение объема межпластовой соли, обрушенной в отработанные камеры, к общему объему забутовки камеры.

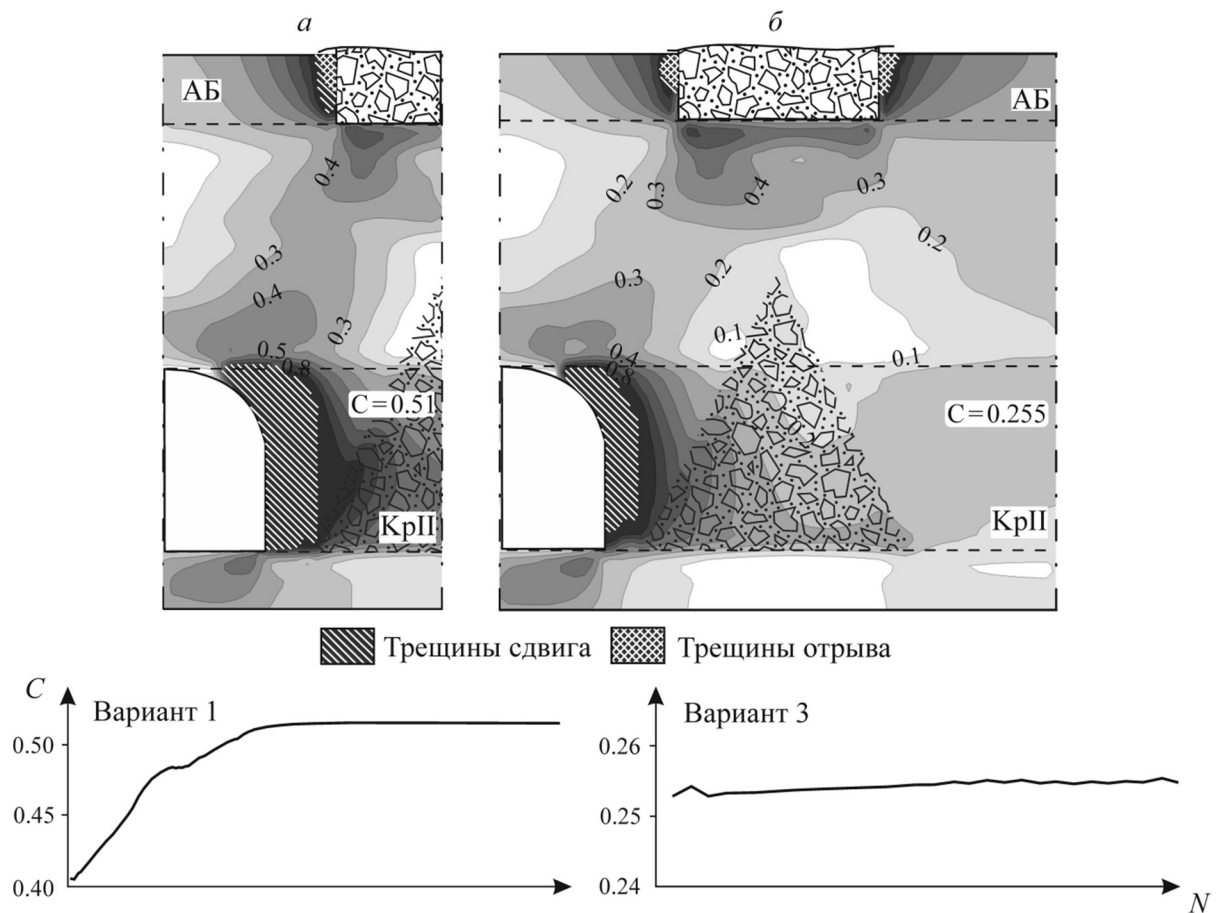


Рис. 7. Результаты оценки степени нагружения междукамерных целиков при повторной отработке природно-техногенного пласта КрII* методом математического моделирования: а — вариант 1 ($a=3.2$ м, $b=5.8$ м, $m=3.1$ м); б — вариант 3 ($a=3.2$ м, $b=14.8$ м, $m=3.1$ м)

Для каждого предлагаемого варианта системы разработки рассчитан коэффициент извлечения запасов ω с учетом относительного разубоживания руды [9]:

$$\omega = \frac{S_0}{m_0 l} (1 - k_{\text{раз}}),$$

где S_0 — площадь поперечного сечения очистной камеры (для комбайна “Урал-61” $S_0 = 8.7$ м²); $m_0 = 3.1$ м — вынимаемая мощность при отработке пласта; l — межосевое расстояние; $k_{\text{раз}}$ — коэффициент относительного разубоживания руды.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета технологических параметров системы разработки при различных вариантах повторного извлечения запасов пласта КрII*

Вариант повторной проходки	Ширина целика b , м	Межосевое расстояние l , м	Степень нагружения C	Относительное разубоживание $k_{\text{раз}}$, %	Извлечение ω , %
Отработка комбайном “Урал-61” ($m=3.1$ м, $a=3.2$ м, $S_0=8.7$ м ²)					
1 (по целикам)	5.8	9	0.51	0	31
2 (по камерам)	5.8	9	0.41	16	26
3 (по целикам)	14.8	18	0.26	0	16
4 (по камерам)	14.8	18	0.26	16	13

Как и следовало ожидать, наибольший коэффициент извлечения калийной руды достигается в случае сохранения при повторной разработке межосевого расстояния 9 м. Однако для этих схем (варианты 1 и 2 в табл. 2) расчетное значение степени нагружения междокамерных целиков превышает величину, регламентируемую действующим нормативным документом [9]: $[C] \leq 0.4$.

При переходе на межосевое расстояние 18 м (варианты 3 и 4 в табл. 2) выполняются требования $[C] \leq 0.4$, но уменьшается коэффициент извлечения руды из недр. Предпочтительным оказался вариант повторной очистной выемки по первичным междокамерным целикам. В этом случае обеспечивается меньшее разубоживание руды и снижается риск обрушения кровли при проходке камер. Таким образом, для проведения опытно-промышленных испытаний повторной отработки природно-техногенного пласта КрII* рекомендуется принять схему с проходкой камер по осям первичных междокамерных целиков и межосевым расстоянием 18 м.

Необходимым условием реализации повторной отработки калийной руды являются опытно-промышленные работы. В процессе их выполнения должны быть оборудованы пункты инструментальных наблюдений за деформированием целиков и конвергенцией камер путем установки контурных и глубинных реперов. В целях контроля за состоянием междокамерных целиков желательным также применение геофизических методов [16, 17]. Полновесное проведение этого комплекса работ позволит выбрать оптимальные по безопасности параметры системы разработки и увеличить общее извлечение руды из недр.

ВЫВОДЫ

На основе комплекса экспериментальных и теоретических исследований для условий Верхнекамского месторождения калийных солей обоснована возможность повторной отработки запасов сильвинитового пласта КрII. Сформированный техногенный пласт КрII* является непрерывным с достаточной вынимаемой мощностью и периодически изменяющимися механическими свойствами: предел прочности на сжатие пород забутовки камер составляет 3.4 МПа, пород исходных междокамерных целиков — 12.0 МПа, при фоновом значении, характерном для рудника БКПРУ-2, — 18.2 МПа.

Методами математического моделирования дана оценка степени нагружения неоднородных по ширине междокамерных целиков, которые формируются в процессе повторной очистной выемки. Наиболее предпочтительным вариантом повторной отработки запасов природно-техногенного пласта КрII*, обеспечивающим безопасные условия ведения горных работ и приемлемый уровень извлечения руды, является проходка очистных камер по осям первичных междокамерных целиков с межосевым расстоянием 18 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А. Б. Практическая геомеханика. — М.: Горн. книга, 2006. — 391 с.
2. Hebblewhite B. K. Safe pillar extraction practice — some geotechnical principles based on Australian experience, Proc. 30th Int. Conf. on Ground Control in Mining, Morgantown, WV, 2011. — P. 105–111.
3. Galvin J. M. Ground engineering — principles and practices for underground coal mining, Springer Int. Publish., 2016. — 684 p.
4. Борзаковский Б. А., Папулов Л. М. Закладочные работы на Верхнекамских калийных рудниках: справочник. — М.: Недра, 1994. — 234 с.

5. Пат. 95114813/03 РФ. Способ разработки пологих пластов полезных ископаемых / Н. Ф. Аникин, В. И. Воронцов, В. Е. Мараков, М. П. Нестеров, Л. М. Папулов, Б. Ф. Панасюк, Е. С. Сивков, Г. П. Шаманский, Л. Н. Яковкин // Оpubл. в БИ. — 1997. — 6 с.
6. Хайрутдинов М. М., Вотяков М. В. Возможность применения систем с твердеющей закладкой при отработки калийных месторождений // ГИАБ. — 2007. — № 9. — С. 265–268.
7. Пат. 2011131320/03 РФ. Способ вторичной отработки соляного пласта / М. М. Бей, В. Е. Мараков, А. А. Сальников, Е. К. Котляр // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 33. — 7 с.
8. Константинова С. А., Ваулина И. Б. Влияние закладки выработанного пространства на напряженно-деформированное состояние карналлитовых междукammerных целиков // Изв. ТГУ. Науки о Земле. — 2012. — № 1. — С. 71–76.
9. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент). — СПб., 2008. — 101 с.
10. Tournaire M. Des dimensions a donner aux pilliers des carriers et des Pressions aux quelles les terrains sont soumis dans les profondeurs, Annales des mines, Paris, 1884, Vol. 5. — P. 415–429.
11. Шевяков Л. Д. О расчете прочных размеров и деформаций опорных целиков // Изв. АН СССР, ОТН. — 1941. — № 7–9. — С. 27–34.
12. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975. — 400 с.
13. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987. — 221 с.
14. Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород: задачи и методы их изучения в связи с вопросами управления горным давлением. — М.: Углетехиздат Западугля, 1947. — 180 с.
15. Барях А. А., Самоделкина Н. А. К расчету устойчивости целиков при камерной системе разработки // ФТПРПИ. — 2007. — № 1. — С. 11–20.
16. Baryakh A., Sanfirov I., Asanov V., Babkin A., Gheghin A., Toksarov V., and Bruev A. Tool checking of salt pillars state for prediction of their residual time working, Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wroclawskiej, Wroclaw, 2001, Vol. 73, No. 40. — P. 22–24.
17. Барях А. А., Самоделкина Н. А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 33–46.

Поступила в редакцию 14/IV 2020

После доработки 20/IV 2020

Принята к публикации 29/V 2020