

уменьшением примеси NaCl количество нерастворимого остатка несколько возрастает, что может говорить о более значимой роли эоловых процессов. Таким образом, границы полей на предложенной типизации для других месторождений могут быть адаптированы с учетом локальной специфики седиментационных процессов.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00046.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атлас структур и текстур галогенных пород СССР / науч. ред. Я.Я. Яржемский; ВНИИГ. – Л., Недра, 1974. – 231 с.
2. Валяшко М.Г. Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. – М.: МГУ, 1962. – 397 с.
3. Протопопов А.Л., Петров Е.В. Некоторые особенности постседиментационных преобразований калиеносных пород (на примере Верхнекамского и Старобинского месторождений) // Основные проблемы соленакпления: [сб. ст.]. – Новосибирск, 1981. – С. 59-71.

## МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.83

DOI:10.7242/echo.2020.1.7

### ВЛИЯНИЕ БАРЬЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ НА СТЕПЕНЬ НАГРУЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕРНОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ

П.А. Глебова

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Методами математического моделирования с целью определения влияния барьерных целиков на элементы камерной системы разработки проведен анализ перераспределения вертикальных нагрузок на основе гипотезы действия веса всей налегающей толщи, а также метода фиктивных целиков. Выполнена оценка устойчивости целиков путем определения их степени нагружения.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, горное давление, барьерные целики, междукамерные целики, степень нагружения.

Правильный выбор системы разработки рудника является первоочередным фактором, обеспечивающим его защиту от затопления.

При освоении калийных и соленых месторождений одной из наиболее применяемых является камерная система разработки с оставлением междукамерных целиков (МКЦ). В этом случае определение их степени нагружения, как критерия устойчивости, в основном базируется на методике Турнера – Шевякова [1, 2], которая нашла широкое практическое применение в инженерной геомеханике. В основе метода лежит предположение, что давление на целики определяется весом столба пород от кровли залежи до земной поверхности и ограниченного осями симметрии камер, прилегающих к целику.

Особенности геологического строения месторождения, таких как большая глубина отработки, или возникновение других сложных проблем приводят к невозможности использования периодической системы междукамерных целиков, в частности за счет существенного увеличения горного давления. В таких случаях отработку целесообразно вести камерной системой разработки с поддержанием вышележащей толщи опорными барьерными разгружающими целиками (БЦ) в сочетании с междукамерными целиками. Характерными примерами могут служить Жезказганское (Казахстан) [3] и Саскачеванское (Канада) [4] месторождения.

Идея управления горным давлением барьерными целиками состоит в следующем [5]. Широкие барьерные целики в сравнении с междукамерными обладают повышенной жесткостью и несущей способностью. За счет оставления целиков разной жесткости можно создать условия неполной подработки для междукамерных целиков, что приведет к их разгрузке. Таким образом, барьерные целики воспринимают на себя значительную нагрузку, а междукамерные, находясь в условиях неполной подработки, только часть полного веса столба пород до поверхности. Экспериментальные исследования, проводимые на месторождениях с системой разработки барьерными и междукамерными целиками, приведенные в источнике [3], подтверждают данную теорию. Согласно им, разгрузка междукамерных целиков может достигать 80%.

Метод Турнера – Шевякова [1, 2] оправдывает себя лишь при условии нахождения целиков в зоне полной подработки. Для залежей, у которых выработанное пространство разделено массивными целиками на отдельные участки с шириной меньше глубины горных работ, давление на целики может быть существенно меньше давления полного веса столба пород, приходящегося на целик [3].

Определение эффекта снятия нагрузки с междукамерных целиков в зависимости от различных параметров является одной из наиболее сложных задач геомеханики в связи с малой изученностью данной темы. Существует ряд различных предположений процесса перераспределения нагрузок между барьерными и междукамерными целиками, но общепринятого мнения в решении данного вопроса не имеется.

С целью дальнейшего развития данной темы в статье представлены результаты анализа перераспределения нагрузок между целиками на основе гипотезы действия равномерно распределенного веса всей налегающей толщи пород, а также метода фиктивных целиков. Выполнена оценка устойчивости несущих элементов путем определения их степени нагружения.

## ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

Оценка несущей способности целиков основывалась на определении их степени нагружения. В основу расчетов положены методики, включённые в нормативные документы по защите калийных рудников от затопления [6]. Так, расчетная степень нагружения целиков показывает отношение действующей средней нагрузки  $P$  к их несущей способности  $Q$ :

$$C = \frac{P}{Q} \quad (1.1)$$

Условием сохранения несущей способности целиков является выполнение неравенства:

$$\frac{P}{Q} < 1 \quad (1.2)$$

Расчетная несущая способность целиков оценивается по формуле:

$$Q = k_f \sigma_m, \quad (1.3)$$

где  $k_f$  – коэффициент формы, характеризующий зависимость несущей способности от отношения ширины целиков  $b$  к их высоте  $m$ ;  $\sigma_m$  – агрегатная прочность пород в массиве.

Коэффициент формы  $k_f$  для пород отрабатываемого пласта определяется из выражений [6]:

$$k_f = \begin{cases} \sqrt{2\lambda}, & \text{при } \lambda \leq 0.5, \\ \beta_0(1 + \beta_m \lambda), & \text{при } \lambda > 0.5, \end{cases} \quad (1.4)$$

где  $\lambda = \frac{b}{m}$  ( $m$  – высота целика),  $\beta_0 = 0.654$ ;  $\beta_m = 1.06$  – параметры аппроксимации.

Агрегатная прочность пород в массиве рассчитывается по формуле:

$$\sigma_m = k_0 \sigma_{сж}, \quad k_0 = k_m k_c k_l, \quad (1.5)$$

где  $\sigma_{сж}$  – эквивалентная (приведенная) прочность пород, слагающих целики;  $k_m$  – коэффициент, учитывающий масштабный фактор;  $k_c$  – коэффициент, учитывающий влияние глинистых прослоек;  $k_l$  – коэффициент, учитывающий влияние прорезки целиков.

В качестве расчетной области выделялась часть породного массива, ограниченная осями симметрии барьерных целиков. При этом, целики обрабатываемого пласта слагались породами с одинаковыми механическими свойствами.

Параметры камерной системы разработки с барьерными целиками представлены на рис. 1.  $B$  – ширина барьерных целиков;  $L$  – расстояние между барьерными целиками,  $b$  – ширина междукамерных целиков;  $a$  – ширина камер.

Рассматривался вариант камерной системы разработки с оставлением барьерных целиков шириной  $B = 29.9$  м. Ширина очистных камер принималась равной  $a = 6$  м ( $n = 8$ ,  $n$  – количество ходов очистных камер), междукамерных целиков –  $b = 4.2$  м. Глубина ведения горных работ составляла  $H = 1120$  м, вынимаемая мощность –  $m_o = 4.7$  м.

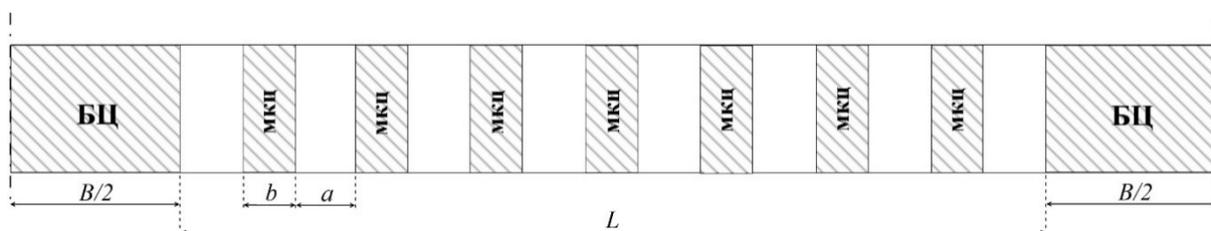


Рис. 1. Параметры системы разработки

Согласно приведенным выше формулам, расчетная несущая способность целиков исследуемого варианта составляла 46.4 МПа и 184.4 МПа для междукамерных и барьерных целиков соответственно. В случае применения периодической системы междукамерных целиков, средняя нагрузка  $P$ , приходящаяся на каждый из них, оценивалась в 62 МПа.

### РАСЧЕТЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ГИПОТЕЗЕ ДЕЙСТВИЯ ВЕСА ВСЕЙ НАЛЕГАЮЩЕЙ ТОЛЩИ ПОРОД

Первый подход основывался на предположении, что нагрузка на все целики полностью определяется весом всей налегающей толщи пород и распределена равномерно.

Математическое моделирование проводилось в упругой постановке для условий плоского деформированного состояния. Граничные условия определялись следующим образом: на боковых границах горизонтальные смещения, а на нижней границе вертикальные – принимались равными нулю. Верхняя граница свободна от усилий. В пределах рассматриваемой области задавались массовые силы интенсивностью  $\gamma$ . Исходное

напряженное состояние ненарушенного горными работами соляного массива считалось гидростатическим:  $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \gamma H$ ,  $\tau_{xy}^0 = 0$ . Численная реализация осуществлялась методом конечных элементов [7]. Расчетная схема представлена на рис. 2.

Оценка распределения нагрузки сводилась к анализу напряженного состояния целиков. Приходящаяся на целики средняя нагрузка  $P$  определялась действующими в кровле целиков вертикальными напряжениями  $\sigma_y$ .

Полученные результаты (рис. 3) отмечают незначительную разгрузку междукамерных целиков по сравнению с периодической системой. Так, центральный междукамерный целик разгружается лишь на 4 %, крайние – на 10%. Их степень нагружения  $C > 1$ , что свидетельствует о потере устойчивости.

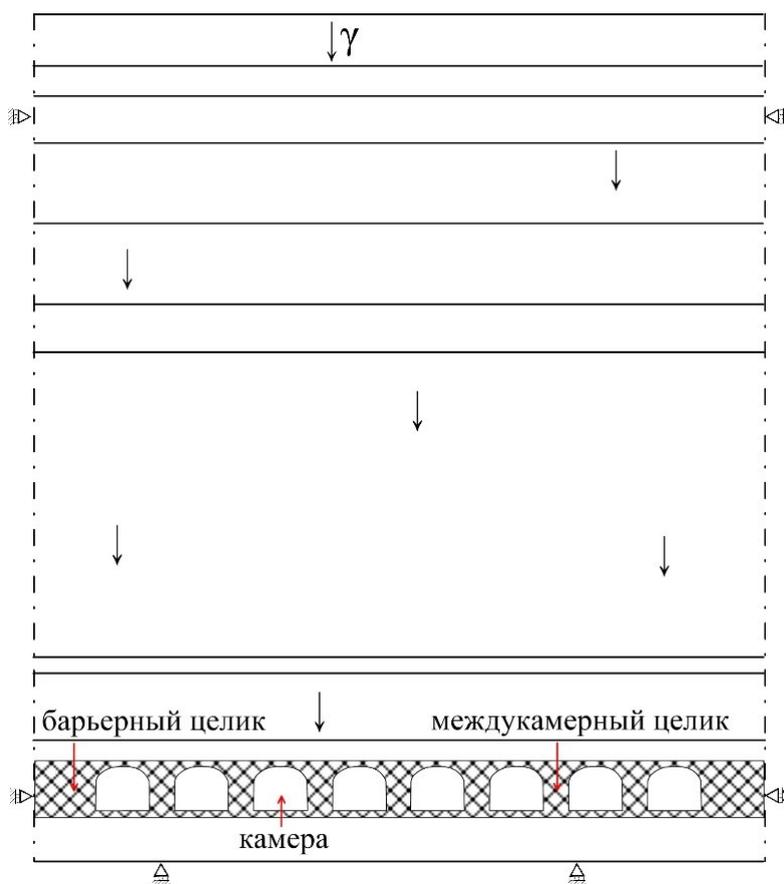


Рис. 2. Расчетная схема

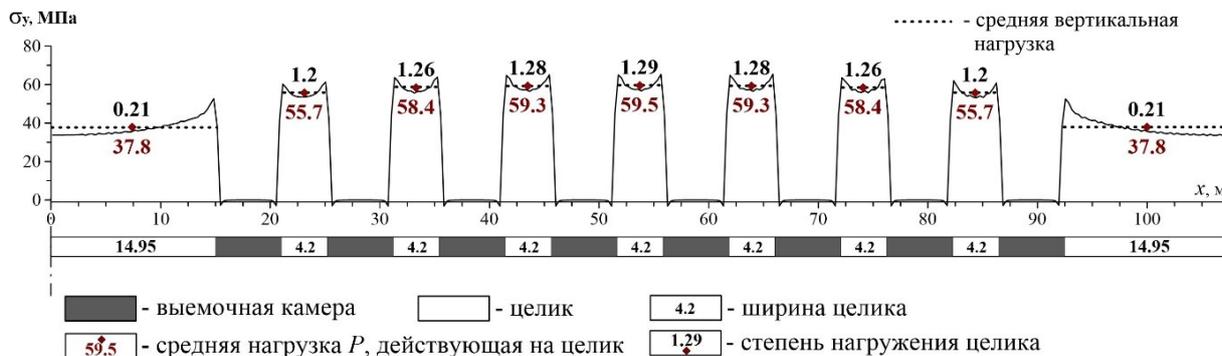


Рис. 3. Распределение вертикальных нагрузок

Однако, как показывает практика, при применении данной системы разработки устойчивость междукамерных целиков обеспечивается [4]. Из чего можно сделать вывод, что междукамерные целики воспринимают нагрузку лишь от некоторой части полного веса столба пород, а основная часть нагрузки приходится на барьерные целики.

Таким образом, очевидно, что гипотеза действия на целики веса всей налегающей толщи пород не позволяет адекватно оценить нагрузку и, следовательно, прогнозировать их устойчивость.

## РАСЧЕТЫ, ОСНОВАННЫЕ НА МЕТОДЕ ФИКТИВНЫХ ЦЕЛИКОВ

Данный вариант моделирования, основан на подходе, который получил название метода фиктивных целиков [8]. В этом случае барьерные целики отражались путем задания по их сечению реакции отпора в виде вертикальной распределенной нагрузки  $q$  (рис. 4). Реакция отпора являлась постоянной и равнялась максимальной нагрузке, которую воспринимают барьерные целики, исходя из полного веса столба пород всей панели. Таким образом, создавалось разгружающее воздействие барьерных целиков на междукамерные целики.

Математическое моделирование проводилось в плоской постановке методом конечных элементов аналогично выше описанному варианту. Расчетная схема представлена на рис. 4.

Анализ напряженного состояния кровли барьерных и междукамерных целиков (рис. 5) показал, что центральный междукамерный целик (мкц-4) испытывает лишь 44% от давления полного веса пород, приходящихся на этот целик, т.е. разгрузка составляет 56%. Наблюдается полная разгрузка крайних междукамерных целиков (мкц-1, мкц-7). В целом, полученные результаты являются адекватными: степень нагружения целиков  $S < 1$ , что свидетельствует о сохранении устойчивости междукамерных целиков. Вместе с тем, принятый в расчетах отпор барьерных целиков является условно максимальным, поскольку может сформироваться только после разрушения всех междукамерных целиков.

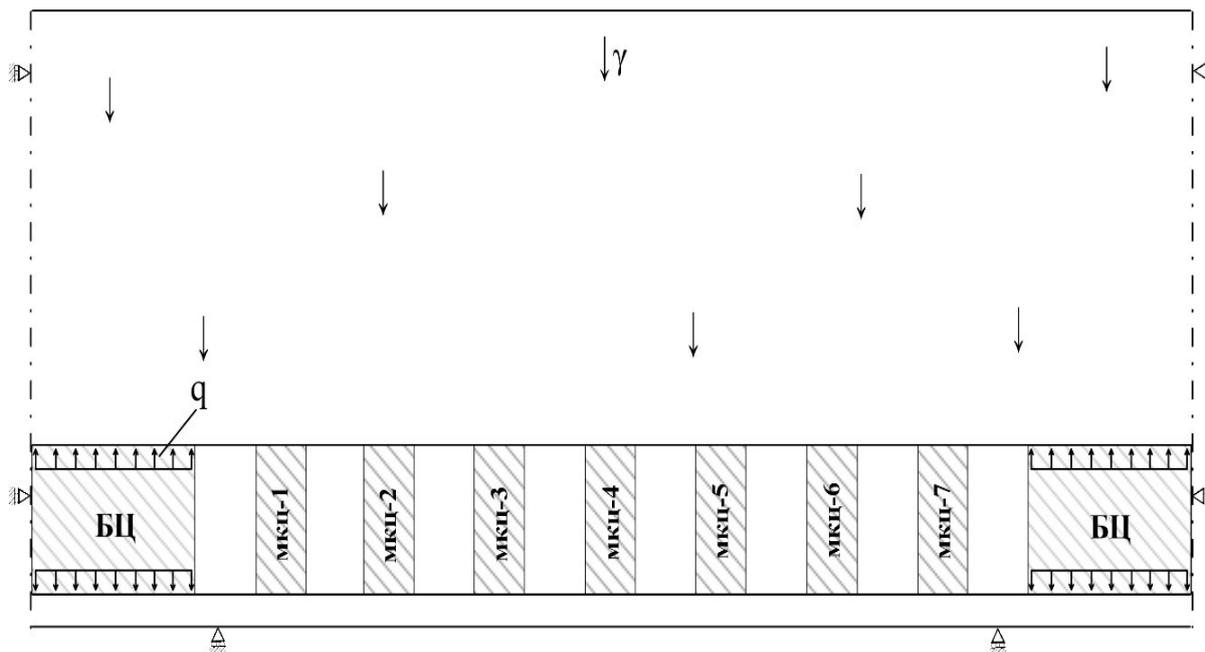


Рис. 4. Расчетная схема

