

# МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2024.4.7

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОЙ ОТРАБОТКЕ СИЛЬВИНИТОВОГО ПЛАСТА

Н.Л. Бельтюков<sup>1</sup>, Н.Д. Черноусов<sup>2</sup><sup>1</sup> Горный институт УрО РАН, г. Пермь<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

**Аннотация:** В результате выполненных экспериментальных исследований получена зависимость изменения прочности неоднородных образцов от ширины слабого слоя. Установленная закономерность позволяет проводить оценку степени нагружения неоднородных междукамерных целиков, формируемых при двухстадийной отработке сильвинитового пласта с закладкой камер I-й очереди. Также рассмотрены некоторые перспективные варианты двухстадийной отработки, для которых рассчитаны технико-экономические параметры.

**Ключевые слова:** камерная система разработки, закладка, двухстадийная отработка, неоднородные междукамерные целики, сложносоставные образцы, эквивалентная прочность.

Главной особенностью при отработке калийных месторождений является необходимость предотвращения попадания пресных вод и слабонасыщенных рассолов в выработки. Защита рудника от затопления достигается за счет обеспечения сохранности водозащитной толщи пород (ВЗТ) между кровлей верхнего отрабатываемого пласта и почвой водоносного горизонта. Поэтому при разработке месторождений данного типа наибольшее распространение получила камерная система с поддержанием ВЗТ на ленточных междукамерных целиках. Вместе с тем главным недостатком применяемой системы являются оставляемые в целиках потери полезного ископаемого, которые в среднем составляют 50-60% от общих запасов рудника. Это обуславливает не прекращающийся поиск эффективных технологических схем, обеспечивающих высокую степень извлечения полезного ископаемого и безопасные условия ведения горных работ.

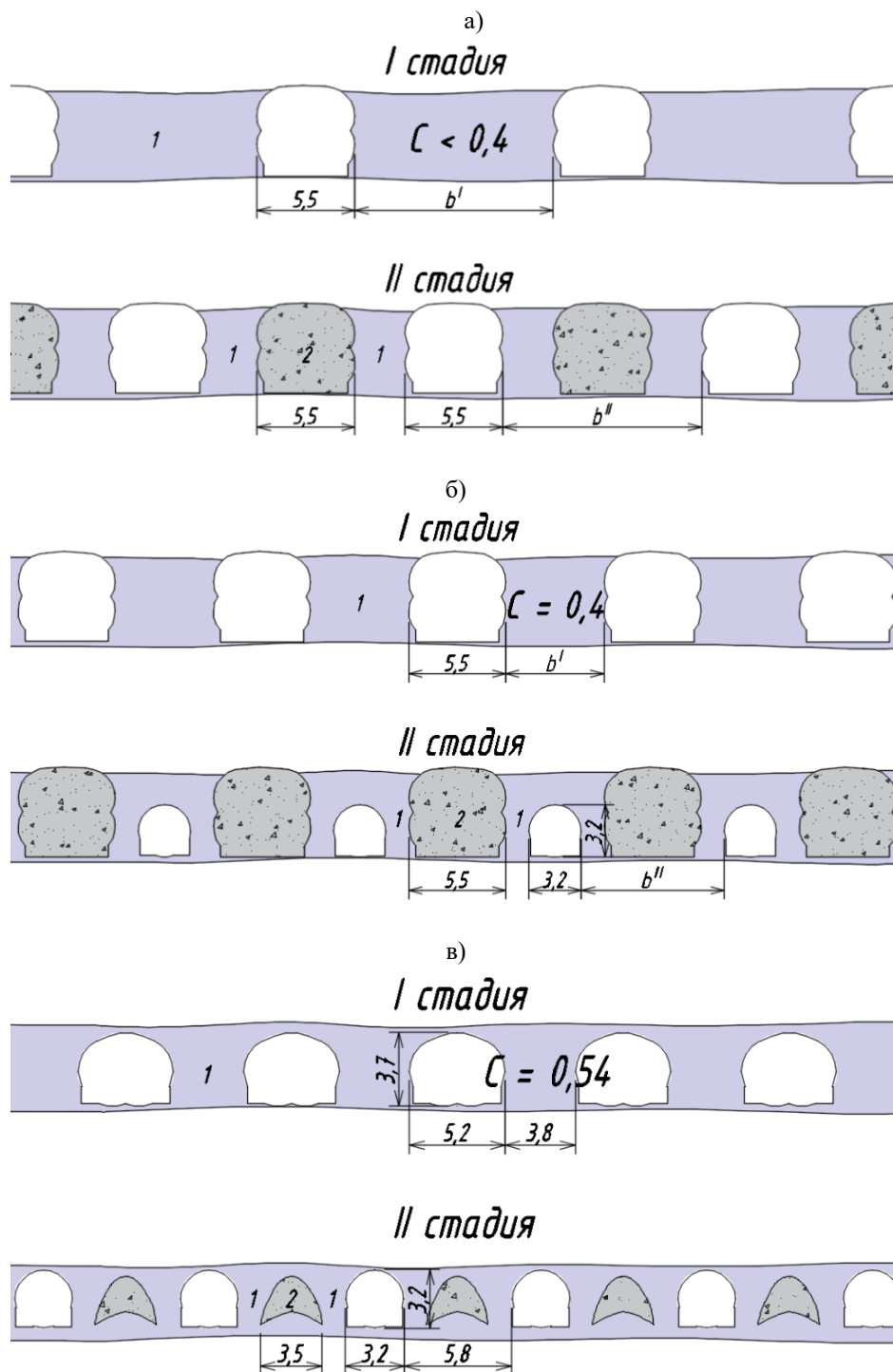
Среди перспективных технологий стоит выделить некоторые разновидности системы двухстадийной отработки сильвинитового пласта (рис. 1). Для условий Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) классический вариант реализации данной системы предполагает оставление на I-й стадии междукамерных целиков шириной, достаточной для обеспечения безопасных условий подработки ВЗТ на II-й стадии, и закладку камер (рис. 1а). Необходимо отметить, что на ВКМКС при расчете параметров целиков одним из основных условий безопасного ведения горных работ является выполнение неравенства:

$$C \leq [C], \quad (1)$$

где  $C$  – расчетная степень нагружения междукамерных целиков (определяется как отношение нагрузки  $Q$ , действующей на целик, к его несущей способности  $P$ ,  $C = Q/P$ ),  $[C]$  – нормативная степень нагружения междукамерных целиков (в большинстве нормальных горно-геологических условий принимается, что  $[C] = 0,4$ ).

Таким образом, в классическом варианте реализации системы двухстадийной отработки степень нагружения целиков  $C^{II}$ , формируемых на II-й стадии, не должна превышать значения 0,4 (обычно для достижения максимального извлечения расчет параметров целиков ведут при выполнении равенства  $C^{II} = 0,4$ ). Если параметры очистных ка-

мер на двух стадиях одинаковы, а закладочный массив представлен только отходами калийного производства, без добавления твердеющего состава, с прочностью значительно меньшей прочности пород сильвинитового пласта, то на I-й стадии необходимо оставлять целики, степень нагружения которых  $C^I$  существенно ниже значения 0,4 ( $C^I < 0,4$ ).



**Рис. 1.** Варианты системы двухстадийной обработки сильвинитового пласта:  
 а – «классическая» двухстадийная система разработки (вариант № 1);  
 б – доизвлечение запасов за счет ввода в обработку II-й стадии (вариант № 2);  
 в – повторная обработка природно-техногенного пласта (вариант № 3);  
 1 – рудосодержащий (породный) массив; 2 – закладочный (техногенный) массив;  
 $C$  – степень нагружения целиков

Другим вариантом рассматриваемой системы может являться ввод в обработку II-й стадии, когда данное техническое решение не было изначально предусмотрено при первичной обработке пласта. Здесь для ВКМКС можно выделить как минимум два случая: 1) когда на I-й стадии обработка велась с оставлением жестких целиков, степень нагружения которых была близка к 0,4, и закладкой камер (рис. 1б); 2) когда на I-й стадии обработка велась с оставлением податливых целиков, степень нагружения которых была больше 0,4 (рис. 1в). Во втором случае, как показали результаты исследований в [1], разрушение податливых целиков и заполнение камер их обломками и вмещающими породами под действием горного давления приводит к формированию природно-техногенного пласта, пригодного для повторной обработки. Обеспечение устойчивости целиков на II-й стадии в представленных на рис. 1б и 1в случаях может достигаться за счет уменьшения вынимаемой мощности и ширины камер II-й очереди, а также увеличением межосевого расстояния (повторная обработка не каждого целика).

Общей особенностью изображенных на рис. 1 вариантов является то, что на II-й стадии междукамерные целики имеют неоднородное по ширине строение и представляют собой чередование разнопрочных породных массивов. Оценка несущей способности и расчет параметров таких целиков есть нетривиальная задача. В связи с этим была проведена серия лабораторных экспериментов по определению прочности сложносоставных образцов, которые с некоторыми допущениями можно рассматривать в качестве физических моделей неоднородных целиков.

Для выполнения экспериментов изготовлены несколько серий кубических сложносоставных образцов, состоящих из 3-х вертикально-ориентированных слоев бетона разной прочности (рис. 2):  $\sigma_1$  – прочность крепкого слоя,  $\sigma_2$  – прочность слабого слоя. Слабый слой шириной  $b_2$  размещался по центру образца, а два крепких слоя суммарной ширины  $b_1$  по краям. Ширина слабого слоя  $b_2$  варьировалась в некотором диапазоне, тогда как общий размер образцов во всех сериях испытаний оставался примерно постоянным –  $100 \times 100 \times 100$  мм. Состав цементно-песчаной смеси крепкого и слабого слоёв старались поддерживать одинаковым во всех сериях. Определение прочности крепкого  $\sigma_1$  и слабого  $\sigma_2$  слоев в серии выполнялось по однородным контрольным образцам, заливаемых одновременно с заливкой каждого слоя. Испытания на одноосное сжатие выполнялись на электромеханическом прессе Zwick Z400. Нагружение образцов осуществлялось вдоль слоистости.

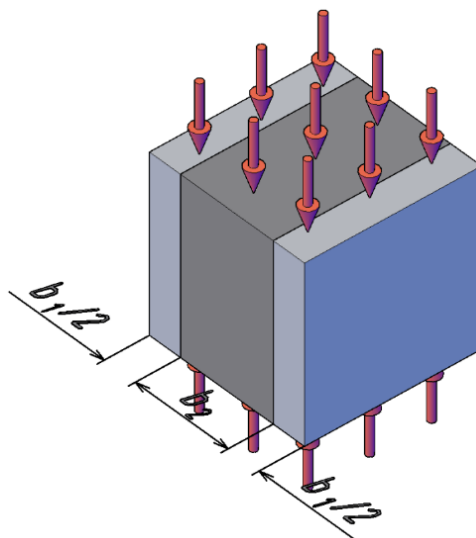


Рис. 2. Строение неоднородного образца и схема его нагружения:  
 $b_1$  – суммарная ширина крепкого слоя;  $b_2$  – ширина слабого слоя

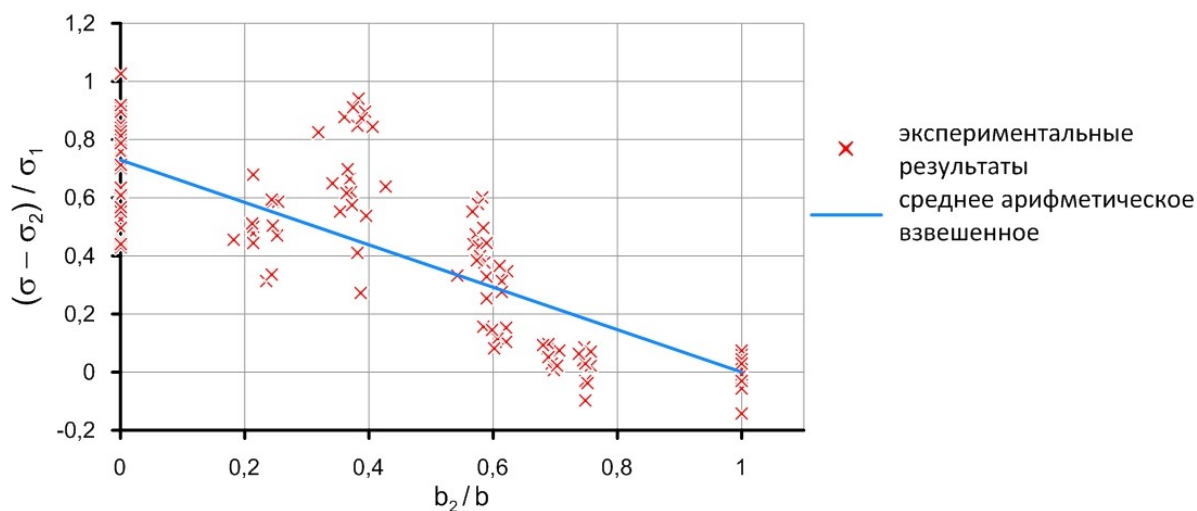
В процессе проведения экспериментальных исследований было испытано 123 образца с различным соотношением ширины слабого слоя  $b_2$  к общей ширине образца  $b$  ( $b = b_1 + b_2$ ). Обработка результатов заключалась сначала в нахождении средних значений прочности крепкого  $\sigma_1$  и слабого  $\sigma_2$  слоев каждой серии по контрольным образцам. Затем с целью минимизировать влияние непостоянства состава цементно-песчаной смеси и условий изготовления прочность  $\sigma$  каждого сложносоставного образца серии нормировалась к данным величинам.

На рис. 3 показан характер изменения нормированной прочности неоднородных образцов от относительной ширины слабого слоя. Анализ полученных результатов показал существенный разброс экспериментальных данных. Тем не менее можно наблюдать некоторую корреляционную связь между данными величинами. С увеличением ширины слабого слоя  $b_2$  прочность неоднородного образца понижается от значений, близких к прочности крепкого слоя  $\sigma_1$ , до прочности слабого слоя  $\sigma_2$ , которые установлены по контрольным образцам. Также на графике представлена прямая, описывающая изменение прочности неоднородных образцов в соответствии с функцией среднего арифметического взвешенного:

$$\sigma(b_1 + b_2) = \sigma_1 b_1 + \sigma_2 b_2, \quad (2)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – средние значения прочности крепкого и слабого слоев соответственно, полученные в результате осреднения экспериментальных данных;  $b_1$  и  $b_2$  – суммарные ширины крепкого и слабого слоев соответственно;  $b = b_1 + b_2$  – общая ширина образца.

Как видно, данная зависимость удовлетворительно описывает экспериментальные результаты и в случае оценки эквивалентной прочности сложносоставных образцов с ориентацией слоев вдоль оси нагружения является более подходящей, чем функция среднего гармонического взвешенного, которая часто применяется при решении подобных задач [2, 3].



**Рис. 3.** Характер изменения нормированной прочности неоднородных образцов от относительной ширины слабого слоя

Полученные закономерности использовались для расчета несущей способности неоднородных междукамерных целиков, оставляемых при вариантах двухстадийной отработки, представленных на рис. 1. Расчеты выполнялись для стандартных горно-геологических условий сильвинитового пласта КрII ВКМКС. Глубина кровли пласта и мощность принимались равными 350 м и 4,7 м соответственно. Для вариантов отработки 1 и 2 про-

ходка камер I-й очереди выполнялась комбайном Урал-20Р в 2 хода по высоте на полную мощность пласта. Соответственно, ширина закладочного массива  $b_2$  в неоднородных целиках II-й очереди при данных вариантах принималась 5,5 м. Проходка камер на II-й стадии в варианте 1 осуществляется комбайном Урал-20Р в 2 хода по высоте на полную мощность пласта ( $a = 5,5$  м,  $m_0 = 4,7$  м), а в вариантах 2 и 3 – комбайном Урал-61 в 1 ход ( $a = 3,2$  м,  $m_0 = 3,2$  м). Камеры II-й очереди во всех вариантах проводят по осям целиков, оставленных на I-й стадии отработки. На основании результатов исследований [1] в варианте 3 ширина техногенного массива  $b_2$  принималась равной 3,5 м, а прочность разрушенных податливых целиков  $\sigma_1$  и техногенного массива  $\sigma_2$  – 12,0 МПа и 3,5 МПа соответственно.

В вариантах 1 и 2 отдельным вопросом, требующим дополнительного изучения, является поведение неоднородных междукамерных целиков на II-й стадии. По опыту эксплуатации рудников ВКМКС известно, что закладка камер на 100% от их высоты технически не осуществима. В среднем при гидравлическом способе закладки степень заполнения камер составляет около 0,7, при этом остается незаполненное пространство между кровлей камеры и поверхностью закладочного массива. По мнению некоторых исследователей [4], наличие зазора между закладкой и кровлей камеры приводит к тому, что породные целики, расположенные по бокам от закладочного массива, разрушаются раньше, чем закладка «вступает в работу», т.е. до касания кровлей камер поверхности закладки.

Наличие этого зазора не было отражено в проведенных экспериментах по физическому моделированию несущей способности неоднородных целиков. Однако данный аспект можно учесть, приняв в вариантах 1 и 2 для неоднородных целиков II-й стадии пониженные значения прочности крепкого слоя  $\sigma_1$ , характерные для разрушенных податливых целиков – 12,0 МПа [1]. Прочность выдержанного закладочного массива по данным [4] составляет 3,5 МПа. Таким образом, для всех 3-х вариантов (рис. 1) в расчетах параметров неоднородных целиков II-й стадии можно принять значения прочности породного  $\sigma_1$  и закладочного (техногенного)  $\sigma_2$  массивов – 12,0 МПа и 3,5 МПа соответственно. За прочность пород, слагающих целики I-й стадии, возьмем стандартные показатели, характерные для пласта КрII – 23,0 МПа.

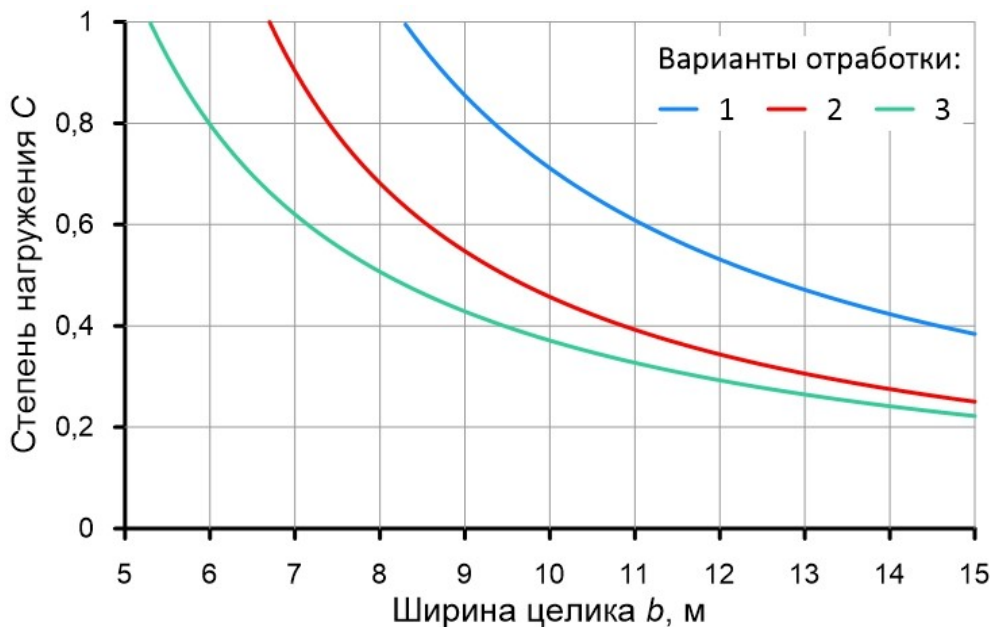
Цель расчетов заключалась в определении оптимальной ширины неоднородного междукамерного целика, оставляемого на II-й стадии отработки пласта, который в соответствии с нормативным документом [3] должен обеспечивать «жесткий» режим поддержания ВЗТ, т.е. его степень нагружения  $C^H$  не должна превышать значения 0,4. Согласно [3] степень нагружения междукамерного целика  $C$  в общем случае рассчитывается как:

$$C = \frac{\gamma H_0 (a+b)}{k_f k_m k_c k_l \sigma_0 b^2}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – объемный вес налегающей толщи пород ( $\gamma = 2,15 \cdot 10^{-2}$  МПа/м);  $a$  – ширина камеры;  $b$  – ширина междукамерного целика (в случае неоднородных целиков  $b = b_1 + b_2$ , где  $b_1$  и  $b_2$  – суммарные ширины рудосодержащего и закладочного массивов соответственно);  $H_0$  – расстояние от земной поверхности до кровли целиков ( $H_0 = 350$  м);  $k_f$  – коэффициент формы целиков;  $k_m$  – коэффициент, учитывающий влияние масштабного фактора ( $k_m = 1,12$ );  $k_c$  – коэффициент, учитывающий влияние глинистых прослоек ( $k_c = 0,75$ );  $k_l$  – коэффициент, учитывающий влияние прорезки целиков ( $k_l = 1,25$ );  $\sigma_0$  – эквивалентная прочность пород, слагающих целики.

Величина  $\sigma_0$  в расчетах определялась согласно выражению (2) в зависимости от значений прочности породного  $\sigma_1$  и закладочного (техногенного)  $\sigma_2$  массивов, а также со-

отношения ширины закладочного (техногенного) массива и общей ширины целика ( $b_2/b$ ). Таким образом, используя выражения (2), (3) и исходные данные, представленные выше, можно построить кривые изменения степени нагружения неоднородного целика на II-й стадии  $C^{II}$  в зависимости от его ширины  $b^{II}$  для рассматриваемых вариантов двухстадийной отработки пласта (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость степени нагружения неоднородных междукамерных целиков II-й очереди от их ширины при двухстадийной отработке:  
1 – вариант № 1; 2 – вариант № 2; 3 – вариант № 3

Анализ полученных кривых показал, что для соблюдения нормативного значения степени нагружения  $C^{II} = 0,4$  на II-й стадии двухстадийной системы отработки необходимо оставлять междукамерные целики шириной: в варианте 1 – 14,6 м; в варианте 2 – 10,9 м, в варианте 3 – 9,5 м. Особенностью вариантов 2 и 3 является то, что при первичной отработке изначально не предусматривалось последующее доизвлечение запасов пласта за счет ввода II-й стадии. Поэтому для обеспечения соосности камер с целиками I-й очереди ширина междукамерных целиков, оставляемых на II-й стадии, должна удовлетворять выражению:

$$b^{II} = l^I - a^{II}, \quad (4)$$

где  $b^{II}$  – ширина междукамерного целика на II-й стадии отработки;  $l^I$  – межосевое расстояние на I-й стадии отработки;  $a^{II}$  – ширина камеры на II-й стадии отработки.

В варианте 2 чтобы обеспечить степень нагружения целиков  $C^I = 0,4$  на I-й стадии отработки в рассматриваемых горно-геологических условиях межосевое расстояние  $l^I$  должно составлять 10,3 м. Тогда на II-й стадии при проходке камер шириной  $a^{II} = 3,2$  м ширина формируемых неоднородных междукамерных целиков  $b^{II}$  будет 7,1 м. Из представленных номограмм на рис. 4 (кривая 2) видно, что в таком случае степень нагружения целиков  $C^{II}$  примет значение 0,87. Не трудно такие же рассуждения провести для случая проходки камер II-й очереди через целик. В таком случае степень нагружения на II-й стадии в данном варианте составит  $C^{II} = 0,21$ .

Допустим, что в варианте 3 на I-й стадии отработка запасов осуществлялась с оставлением податливых целиков при значениях  $C^I = 0,54$  и межосевом расстоянии  $l^I = 9,0$  м.

Тогда на II-й стадии при проходке камер шириной  $a^{II} = 3,2$  м ширина неоднородных междукамерных целиков  $b^{II}$  составит 5,8 м. Из номограмм на рис. 4 (кривая 3) следует, что при такой ширине целиков  $b^{II}$  степень нагружения  $C^{II}$  равна 0,85, а в случае проходки камер II-й очереди через целик –  $C^{II} = 0,23$ .

Таким образом, в вариантах 2 и 3 при отработке каждого целика на II-й стадии с параметрами  $a^{II} = 3,2$  м и  $m_0^{II} = 3,2$  м и соосным расположением камер степень нагружения неоднородных целиков  $C^{II}$  будет более 0,4, что не соответствует требованиям нормативных документов [3]. Для обеспечения выполнения условия  $C^{II} \leq 0,4$  на II-й стадии в данных вариантах отработку целиков следует выполнять с двукратным межосевым расстоянием (отработка через целик). При этом ширина неоднородных междукамерных целиков  $b^{II}$  в вариантах 2 и 3 будет составлять 17,4 м и 14,8 м, а их степень нагружения  $C^{II}$  – 0,21 и 0,23 соответственно.

Рассчитанные параметры двухстадийной отработки сильвинитового пласта вместе с исходными данными сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров двухстадийной отработки сильвинитового пласта

№ варианта	Стадия	Глубина кровли пласта $H_0$ , м	Ширина камеры $a$ , м	Ширина целика $b$ , м	Вынимаемая мощность $m_0$ , м	Степень нагружения $C$	Ширина заклад. массива $b_2$ , м	Прочность пород $(\sigma_1/\sigma_2)$ , МПа
1	I	350	5,5	14,6	4,7	0,11	-	23,0/-
	II		5,5	14,6	4,7	0,40	5,5	12,0/3,5
2	I	350	5,5	4,8	4,7	0,40	-	23,0/-
	II (каждый целик)		3,2	7,1	3,2	0,87	5,5	12,0/3,5
	II (через целик)		3,2	17,4	3,2	0,21	5,5	12,0/3,5
3	I	350	5,2	3,8	3,7	0,54	-	23,0/-
	I (каждый целик)		3,2	5,8	3,2	0,85	3,5	12,0/3,5
	II (через целик)		3,2	14,8	3,2	0,23	3,5	12,0/3,5

В результате выполненных экспериментальных исследований была получена зависимость изменения прочности неоднородных образцов от толщины слабого слоя, которая на текущей стадии изученности вопроса удовлетворительно описывается функцией среднего арифметического взвешенного. Установленная закономерность позволяет проводить оценку степени нагружения неоднородных междукамерных целиков с использованием регламентируемой для ВКМКС методики [3] без привлечения методов математического моделирования. Выполненные расчеты параметров системы разработки для некоторых вариантов показали, что кроме классической двухстадийной схемы возможны случаи доизвлечения запасов из междукамерных целиков на отработан-

ных ранее площадях, где производилась закладка выработанного пространства, или где камеры были погашены вследствие естественных процессов деформирования и разрушения податливых целиков.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 124020500031-4)*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Бельтюков Н.Л., Самоделкина Н.А., Токсаров В.Н. Обоснование возможности повторной отработки запасов калийных руд // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 3. – С. 85-97. DOI: 10.15372/FTPRPI20200309.
2. Методические указания по определению несущей способности целиков / сост.: Ф.П. Бублик; ВНИМИ. – Л., 1974. – 90 с.
3. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей. Ч. 1. Основные положения: утв. ПАО «Уралкалий». – Пермь, Березники, 2022 г. – 118 с.
4. Борзаковский Б.А., Папулов Л.М. Закладочные работы на Верхнекамский калийных рудниках: справ. – М.: Недра, 1994. – 234 с.

УДК 622.847

DOI:10.7242/echo.2024.4.8

## МЕТОДИКА РАЙОНИРОВАНИЯ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ РУДНИКОВ ВКМКС ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ИХ ЗАТОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНЖЕНЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Евсеев<sup>1</sup>, И.А. Жукова<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Горный институт УрО РАН, г.Пермь  
<sup>2</sup> ПАО «Уралкалий», г. Березники

**Аннотация:** В статье приведен один из вариантов районирования шахтных полей калийных рудников по степени опасности нарушения сплошности водозащитной толщи. Принятый поэтапный подход реализуется на основе инженерных критериев безопасности и методов математического моделирования. Методика позволяет своевременно выявлять потенциально опасные участки с целью дальнейшего принятия мер для предотвращения аварийных ситуаций. Рассмотрено применение методики на примере одного из действующих рудников ВКМКС.

**Ключевые слова:** водозащитная толща, устойчивость ВЗТ, критерии сохранности ВЗТ, категория опасности, районирование.

Важнейшей особенностью строения ВКМКС является легкая растворимость пород водозащитной толщи (ВЗТ), которая отделяет продуктивные пласты от водоносных горизонтов. Интенсивное деформирование подработанного массива может привести к формированию сквозной зоны трещиноватости и проникновению пресных вод в выработанное пространство с последующим затоплением шахты. История горного дела знает множество случаев потери рудников в результате аварийных водопритоков, произошедших в разных странах мира [1]. Известный канадский горный инженер А.Ф. Пруггер отметил: «Верным, вероятно, является утверждение, что из всех калийных рудников, введенных в эксплуатацию, потерянных в результате затопления больше, нежели действующих» [2]. В процессе освоения Верхнекамского месторождения