

- интерферометрии. I. Дифференциальная интерферометрия // Геофизические исследования. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 73-89. – DOI: 10.21455/gr2021.4-5.
4. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
  5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
  6. Baryakh A.A., Samodelkina N.A Rheological analysis of geomechanical processes // Journal of Mining Science. – 2005. – V. 41, № 6. – P. 522-530. – DOI: 10.1007/s10913-006-0015-x.
  7. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
  8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2022.4.7

## РАСЧЕТ СТЕПЕНИ НАГРУЖЕНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ НЕСООСНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ОЧИСТНЫХ КАМЕР

И.С. Ломакин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** На основе анализа изменения напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков методами математического моделирования выполнена оценка степени их нагружения при несоосном расположении камер. Численная реализация математического моделирования проводилась в упругой постановке для условий плоского деформированного состояния методом конечных элементов. По результатам выполненных расчетов установлено, что при несоосном расположении очистных камер методика Турнера-Шевякова дает завышенные оценки степени нагружения междукамерных целиков, поскольку не учитывает разгрузку целиков в условиях подработки.

**Ключевые слова:** степень нагружения, междукамерные целики, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование.

На Верхнекамском месторождении солей (ВКМС) добыча полезного ископаемого ведется камерной системой разработки с поддержанием налегающей толщи на ленточных междукамерных целиках (МКЦ). Расчет степени нагружения МКЦ ( $C$ ) основан на методике Турнера-Шевякова и регламентирован в нормативной документации [1], разработанной для условий ВКМС:

$$C = \xi \gamma H_0 \frac{a+b}{bk_f \sigma_m} \leq [C], \quad (1)$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий изменение нагрузки на целики вследствие влияния различных горнотехнических факторов (пригрузка от солеотвалов, опорное давление, наличие межходовых целиков и др.);  $\gamma$  – объемный вес пород;  $H_0$  – максимальное значение расстояния от земной поверхности до кровли целиков;  $a$  – ширина очистных камер;  $b$  – ширина междукамерных целиков;  $k_f$  – коэффициент формы целиков;  $\sigma_m$  – прочность пород в массиве;  $C$ ,  $[C]$  – соответственно, расчетная и допустимая степень нагружения целика.

Неизменное стремление горнодобывающих предприятий увеличить степень извлечения полезного ископаемого приводит к поиску альтернативных технологических подходов к организации системы подземной разработки. Одним из таких возможных направлений является отработка продуктивных пластов с несоосным расположением очистных камер. Целью представленных исследований являлась оценка степени нагружения междукамерных целиков на основе результатов математического модели-

рования изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) камерного блока при несоосном расположении очистных камер на двух рабочих пластах.

В работе [3] на основе анализа многовариантных вычислительных экспериментов установлена взаимосвязь между степенью нагружения целиков  $C$ , определенной по формуле (1), и нормированной величиной интенсивности касательных напряжений  $K = \sigma_i / \sigma_m$ , где  $\sigma_i = \sqrt{I_2(D_\sigma)}$  – интенсивность касательных напряжений, определяемая величиной второго инварианта девиатора напряжений.

Там же показано, что  $C \approx K'$ , где  $K'$  – максимальная величина показателя  $K$ , достигаемая в каждом вертикальном сечении целика.

Дальнейший анализ позволил определить линейный вид взаимосвязи между нормированной величиной интенсивности касательных напряжений, определенной в центре вертикального сечения целика ( $K^*$ ), и степенью его нагружения, рассчитанной по методике Турнера-Шевякова. Полученная взаимосвязь описывается выражением:

$$C = f(K^*) = 1.05 \cdot K^* - 0.1, \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции 0.98.

Расчеты изменения НДС камерного блока выполнялись для нескольких вариантов выработанного пространства: для случаев отработки только одного продуктивного сильвинитового пласта и в случае их совместной отработки при несоосном расположении очистных камер. Для всех вариантов расчета принималось, что формирование очистных камер осуществляется комбайном одного типа. Параметры рассмотренных вариантов систем разработки представлены в таблице 1. Задача решалась в упругой постановке для условий плоского деформированного состояния методом конечных элементов [4, 5]. Начальное напряженное состояние нетронутого массива принималось гидростатическим.

Таблица 1

Параметры системы разработки

Пласт	Ширина камеры $a$ , м	Ширина МКЦ $b$ , м	Межосевое расстояние $L=a+b$ , м	Вынимаемая мощность $m_0$ , м	Глубина $H$ , м
Верхний	5.1	6.0	11.1	3.1	391
Нижний	5.1	6.0	11.1	5.0	398.1

Принципиальная схема расчета для всех вариантов вычислительных экспериментов представлена на рис. 1. В ней учтены основные особенности геологического строения подработанного массива, параметры камерной системы разработки, действие массовых сил интенсивностью  $\gamma_i$  ( $\gamma_i$  – удельный вес пород  $i$  – го элемента геологического разреза).

Результаты оценки степени нагружения междукламерных целиков, выполненные в соответствии с нормативными документами [1], представлены в таблице 2. Здесь же для сравнения приведены расчеты степени нагружения целиков, полученные методом математического моделирования с использованием соотношения (3) для условий отработки одного рабочего пласта. Как видно, отмечается хорошее согласование результатов математического моделирования с методикой Турнера-Шевякова, аккомодированной под условия ВКМС.

Таблица 2

Степень нагружения целиков при отработке одного рабочего пласта

Пласт	Глубина до кровли пласта, м	Степень нагружения целиков	
		По методике [1]	Математическое моделирование
верхний	391	0.336	0.336
нижний	398.1	0.383	0.382

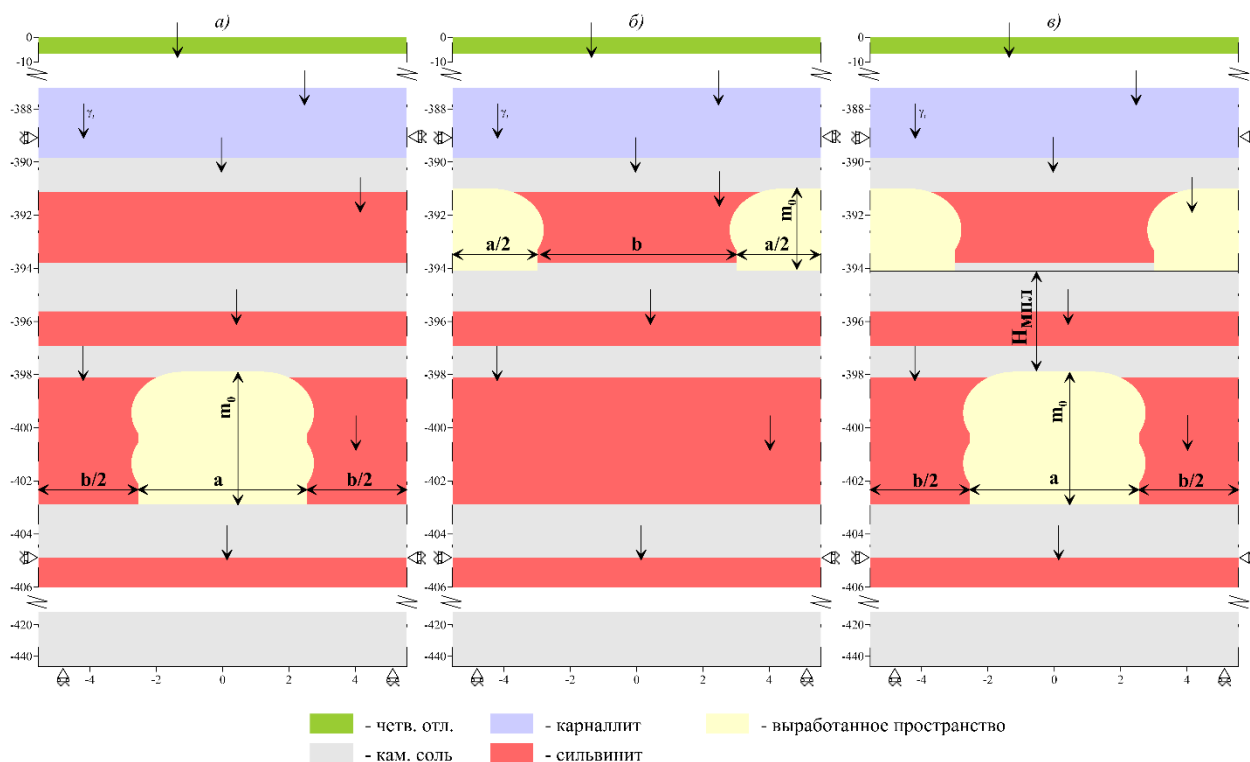


Рис. 1. Принципиальная схема расчета:

- а) при отработке нижнего сильвинитового пласта; б) при отработке верхнего сильвинитового пласта; в) при двухпластовой отработке с несоосным расположением очистных камер

Как уже отмечалось, при двухпластовой отработке формируется взаимосвязанная система очистных камер, которая заведомо должна оказывать влияние на степень нагружения целиков. В таком случае одним из главных факторов, влияющих на степень МКЦ, является мощность технологического междупластья. Выполнена серия численных экспериментов, направленная на определение степени нагружения междукамерных целиков при двухпластовой отработке с несоосным расположением очистных камер и различными мощностями междупластья. Интервал изменения мощности междупластья составил от 2 до 8 м с частотой дискретизации 1 м.

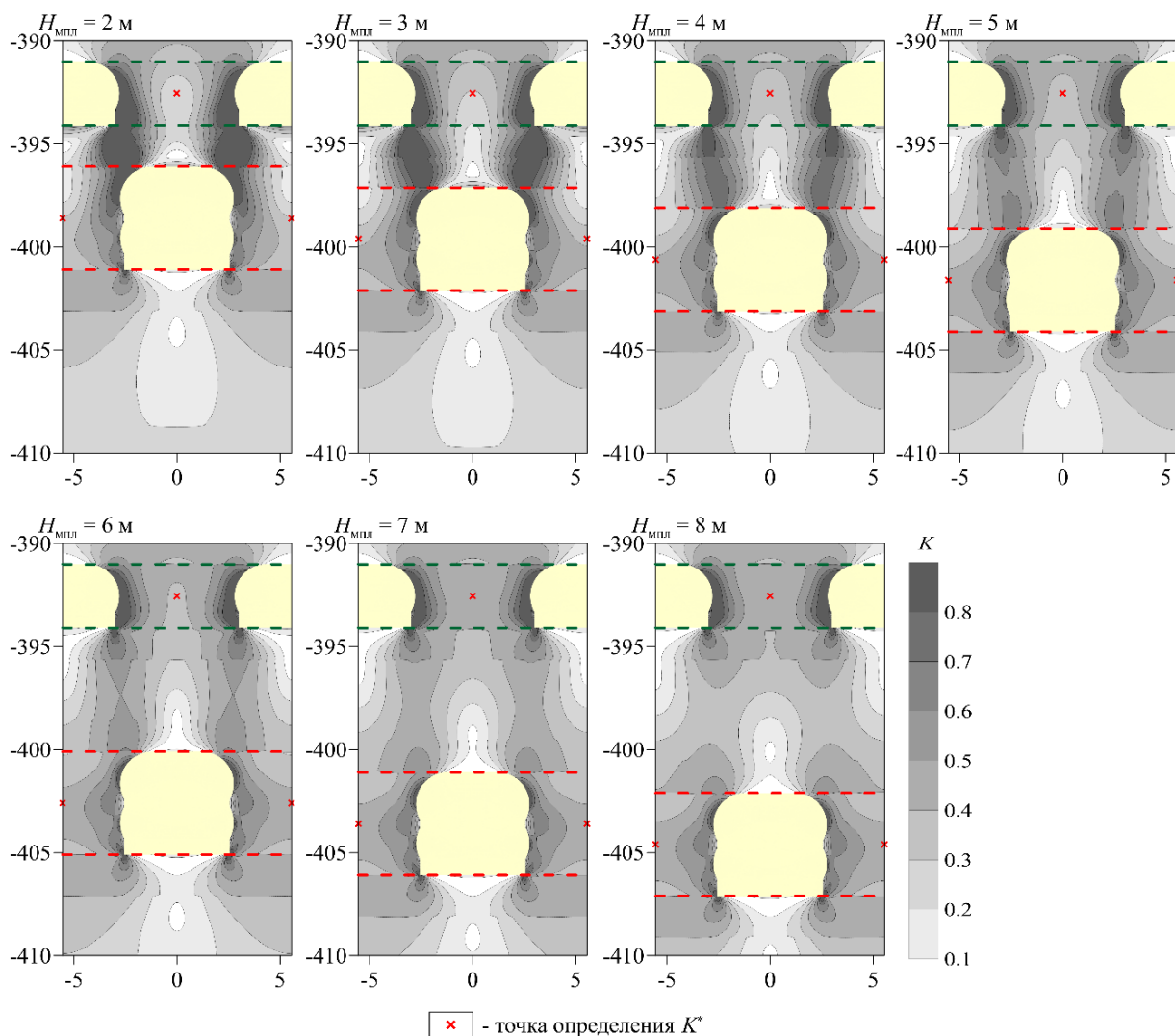
В качестве иллюстрации на рис. 2 представлены распределения нормированной величины интенсивности касательных напряжений в двухпластовом камерном блоке при несоосном расположении камер для различных мощностей междупластья. Как видно, междукамерные целики находятся в разгруженном состоянии, что отражается на значениях степени их нагружения.

Относительное сопоставление оценок степени нагружения целиков при несоосном расположении камер в зависимости от мощности междупластья выполнялось согласно следующему соотношению:

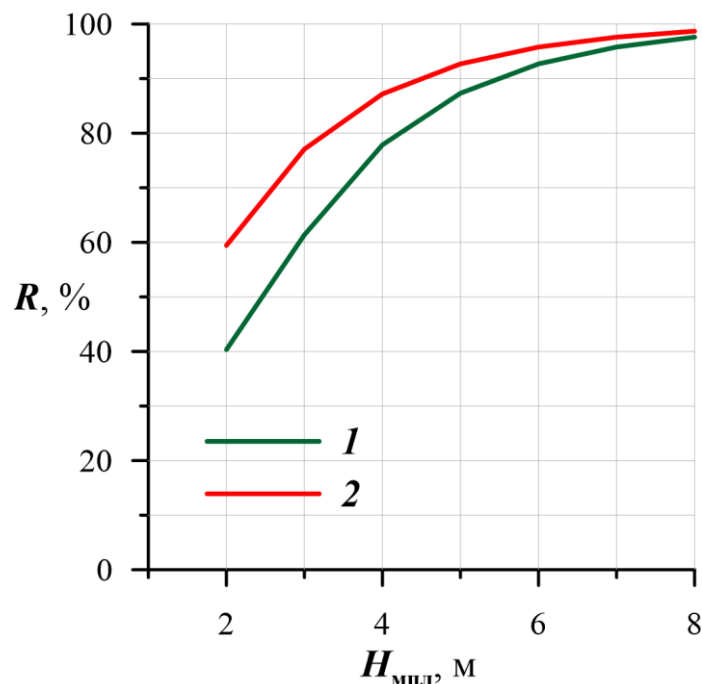
$$R = (C_m/C_0) \cdot 100 \%, \quad (4)$$

где  $C_m$  – степень нагружения, рассчитанная методом математического моделирования,  $C_0$  – по методике [1]. На рис. 3 представлены результаты этого сопоставления. По отношению к расчетным оценкам по стандартной методике Турнера-Шевякова [1] полученные величины степени нагружения междукамерных целиков определяются более низкими значениями. Особенно выражено это проявляется при мощности междупластья менее 4 м. Формально это указывает на возможность повышения извлечения руды при несоосном расположении очистных камер.

Однако при этом возникает опасность обрушения целика с верхнего пласта в камеру нижнего пласта вследствие формирования высоких напряжений в краевых частях междупластья, пронизывающих его по всей высоте.



**Рис. 2.** Распределение нормированной величины интенсивности касательных напряжений при двухпластовой отработке с несоосным расположением очистных камер и различных мощностях междупластья



**Рис. 3.** Сопоставление оценок степени нагружения междукамерных целиков на верхнем пласте (1) и нижнем (2) от мощности технологического междупластья при несоосном расположении очистных камер

Это хорошо иллюстрируется на рис. 2 при мощностях междупластья менее 4 м, где показатель нормированной величины интенсивности касательных напряжений увеличивается до значений  $K > 0.6$ .

В этой связи для анализа возможности повышения извлечения руды за счет несоосного расположения очистных камер требуется выполнение дополнительных детализированных геомеханических исследований с использованием более сложных упругопластических или вязко-упругопластических моделей сплошной среды, с учетом критериев разрушения горных пород, а также параметров отработки пластов для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий разработки.

Таким образом, методами математического моделирования выполнена оценка степени нагружения целиков в случае совместной отработки двух силвинитовых пластов с несоосным расположением очистных камер. Расчеты показали, что при принятых параметрах системы разработки степень нагружения МКЦ оказывается меньше по сравнению со значениями, полученными по методике Турнера-Шевякова, особенно при мощности технологического междупластья менее 4 м. Вместе с тем при несоосном расположении очистных камер могут возникнуть предпосылки к обрушению целиков верхнего обрабатываемого пласта в выработанное пространство нижнего. Обоснование реальных перспектив повышения степени извлечения полезного ископаемого из недр за счет несоосного расположения очистных камер требует дополнительных геомеханических исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.

2. Ломакин И. С. Деформирование и разрушение несущих элементов камерной системы разработки в условиях слоисто-неоднородного строения породного массива: дис. ... к.т.н.: 25.00.20 / Ломакин Иван Сергеевич. – Пермь, 2015. – 197 с.
3. Baryakh A.A., Samodelkina N.A. To the calculation of pillar stability under condition of chamber mining // Journal of Mining Science. – 2007. – V. 43, № 1. – P. 8-16.
4. Zienkiewicz O.S., Taylor R.L., Fox D.D. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. – 7<sup>th</sup> edition. – Oxford: Butterworth-Heinemann, Waltham, 2014. – 672 p. – DOI: 10.1016/C2009-0-26332-X.
5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.

УДК 552.53

DOI:10.7242/echo.2022.4.8

## ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ СИЛЬВИНИТА ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

И.А. Пантелеев<sup>1</sup>, А.С. Соколов<sup>2</sup>, А.А. Барях<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь  
<sup>2</sup>Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** С использованием микротомографа SkiyScan 1272 Bruker проведена съемка образца красного сильвинита размером 20×18×21 мм, включающего две минеральные фазы, соответствующие сильвину и галиту. На основе трехмерных рентгеновских томографических изображений определены объемное содержание каждой фазы и заполненные воздухом нарушения сплошности материала (поры, микротрещины, межзеренные контакты). Для нарушений сплошности вычислены характерные максимальный линейный размер, объем и коэффициент сферичности. Показано, что по объему все выделенные объекты разделяются на пять групп, четыре из которых представляют пороподобные дефекты, а одна – трещиноподобные дефекты.

**Ключевые слова:** сильвинит, томография, морфологический анализ, поры, трещины.

### Введение

В результате многолетних экспериментальных исследований деформационного поведения соляных пород Верхнекамского месторождения при различных видах нагружения показано, что коэффициент вариации механических и прочностных свойств может превышать 30% даже для образцов, изготовленных из одного монолита [1]. Причины такого разброса значений многообразны [2]: вариации объемного содержания различных минералов, вариация среднего размера зерен, наличие разномасштабных несплошностей различной природы, содержание глинистого материала, влажность и т.д.

Петрологическое описание конкретных образцов, характеристика их внутренней структуры, как правило, базируются на описании шлифов и результатах сканирующей (растровой) электронной микроскопии (РЭМ). Шлифы подходят для оценки истории образования и формирования породы, однако возможности детального описания строения с помощью этого метода весьма ограничены ввиду низкого разрешения (не выше толщины шлифа, около 5-40 мкм), присутствия минеральных зерен различной оптической плотности, которые не всегда позволяют с достаточной точностью провести интерпретацию изображения. С другой стороны, при исследовании шлифов есть возможность получения изображений в скрещенных и параллельных николях, что позволяет определять ориентацию кристаллов. РЭМ дает изображения высочайшего разрешения до единиц нм, но они являются двухмерными проекциями трехмерных поверхностей сколов. Основным недостатком вышеперечисленных методов является их двухмерность и