





Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук



Оценка несущей способности соляных целиков с учетом дефектности слагающих пород

Пантелеев И.А., Ломакин И.С., Барях А.А.

д.ф.-м.н., зав. лаб. цифровизации горнотехнических процессов ПФИЦ УрО РАН

## Негативные последствия разрушения поддерживающих

#### **Междукамерные целики** СКРУ-1, 3 ЮЗП, пл. АБ

#### целиков

#### Здания на поверхности г. Березники, ул. Ленина, д. 11







# Затопление рудника БПКРУ-1 (г. Березники, 19.10.2006)







Актуальность

1. Степень нагружения целика по методике Турнера-Шевякова\*:

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

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий изменение нагрузки на целики вследствие влияния различных горнотехнических факторов,  $\gamma$  – объемный вес пород,  $H_0$  – максимальное значение расстояния от земной поверхности до кровли целика, a – ширина очистных камер, b – ширина междукамерных целиков,  $k_f$  – коэффициент формы целиков,  $\sigma_m$  – прочность пород в массиве.

2. Расчет степени нагружения целика с учетом НДС\*\*:

$$C = K^* = \frac{\sqrt{I_2(D_\sigma)}}{\sigma_m} \quad (2)$$

 $K^*$  – значение в центральной точке  $A_1$ ,  $\sigma_m$  – агрегатная прочность пород в массиве,  $\sigma_m = \sigma_0$  – агрегатная прочность породы, равная прочность на одноосное сжатие

\*Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях ВКМКС. — СПб, 2008. \*\*Барях А. А., Самоделкина Н. А. К расчету устойчивости целиков при камерной системе разработки // ФТПРПИ. — 2007. — № 1.

4

### Актуальность

**Цель работы** – оценка степени влияния снижения механических свойств на степень нагружения междукамерного целика в случае меняющегося эффективного давления и при разных пропорциях целика (фактора формы) с использованием данных рентгеновской микротомографии.



Изготовление образца на лабораторном отрезном станке

образец #1

образец #2





#### Геометрические размеры

№ образца	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм
1	19.00	17.78	22
2	18.28	19.57	22

5

#### Схема эксперимента

**Режим нагружения:** циклы «разгрузка-нагрузка» с шагом 2МПа по максимальному приложенному напряжению.

Скорость нагружения: 10 H/c (до  $\sigma_{max} = 14$  МПа), 0.05 мм/мин.

Томографическая съемка: в исходном состоянии и после каждого цикла.

#### Параметры съемки:

напряжение на рентгеновской трубке - 100 кВ; ток - 100 мкА; пространственное разрешение - **12 мкм**; время экспозиции - 3000 мкс; шаг вращения образца 0.3° со съемкой на 360°; высота области съемки Н – 9 мм; длительность одной съемки 8 часов 15 минут.



Рис.2. Электромеханический пресс Zwick/Z250





Рис.3. Микротомограф SkyScan 1272 (Bruker, Бельгия)

# Эволюция дефектной структуры на различных этапах нагружения



образец #1







Рис.4. Характерная кривая деформация образца красного сильвинита

Корректировка диаграммы деформирования на жесткость испытательной машины:

$$u_{\text{obp}} = u_c - u_{\text{x}},$$
 (3)  $u_{\text{x}} = \frac{F + \sqrt{F^2 + 4KFu_{\text{x}}}}{2K}$  (4)

*u<sub>c</sub>* - общее перемещение системы «пресс-образец»,

*u*<sub>ж</sub> - деформация испытательного оборудования, обусловленная его жесткостью.





Рис.6. Зависимость касательного модуля красного сильвинита от максимальной нагрузки



Рис. 7. Зависимость нормированного модуля Юнга красного сильвинита от максимальной нагрузки



Рис. 8. Зависимость нормированного касательного модуля красного сильвинита от максимальной нагрузки

10



Рис. 9. Аппроксимация зависимости нормированного касательного модуля (а) и нормированного коэффициента Пуассона (б) от уровня приложенной нагрузки

#### Аппроксимация:

$$D_{n}^{y} \equiv f_{1}(\sigma_{ax}) = 2.33 - 0.83 \cosh(0.069(0.74\sigma_{ax} - 13.17)) - 0.83 \sinh(0.069(2.4 + 0.74\sigma_{ax}))$$
(5)

### Задача с различным эффективным давлением

![](_page_11_Figure_1.jpeg)

 $\frac{Mатериальные свойства:}{\rho = 2200 \text{ м}^3/кг}$   $D^y{}_0 = 1.1 \Gamma\Pi a$   $v_0 = 0.3$   $\sigma_0 = 23 \text{ М}\Pi a$   $D^y = f_1(\sigma_3)D^y{}_0, v = f_2(\sigma_3)v_0$   $b = \{3.75, 5, 7.5, 10\}$   $\lambda = \frac{b}{h} = \{0.75, 1, 1.5, 2\}$ 

Диапазон изменения эффективного давления

$$\mathbf{p} \in \left[p_1, \gamma H_0 \frac{(a+b)}{b}\right]$$

### Снижение касательного модуля

![](_page_12_Figure_1.jpeg)

Рис. 10. Зависимости эффективного касательного модуля в точке A<sub>2</sub> от эффективного давления (абсолютные значения (а), относительное изменение (б))

![](_page_12_Figure_3.jpeg)

13

(б)

### Увеличение коэффициента Пуассона

![](_page_13_Figure_1.jpeg)

Рис. 11. Зависимости эффективного коэффициента Пуассона в точке A<sub>2</sub> от эффективного давления (абсолютные значения (а), относительное изменение (б))

![](_page_13_Figure_3.jpeg)

## Конвергенция боковых стенок

![](_page_14_Figure_1.jpeg)

Рис. 12. Зависимость конвергенции от эффективного давления (абсолютные значения (а), относительное изменение (б))

![](_page_14_Figure_3.jpeg)

(б)

#### Степень нагружения целика

![](_page_15_Figure_1.jpeg)

Рис. 13. Зависимость степени нагружения целика от эффективного давления для различных значения форм-фактора λ

Степень нагружения целика (силовая):

$$C = K^* = \frac{\sqrt{I_2(D_\sigma)}}{\sigma_m} \qquad (7)$$

 $K^*$  - значение в центральной точке  $A_2$ ,  $\sigma_m$  - агрегатная прочность пород в массиве,  $\sigma_m = \sigma_0$  - прочность на одноосное сжатие Вариант № 1: учет деградации агрегатной прочности с ростом поврежденности

$$C_{\sigma_m} = \frac{\sqrt{I_2(D_\sigma)}}{\sigma_m(D^y)} \qquad (8)$$

$$C_{\sigma\varepsilon} = \frac{\sqrt{I_2(D_{\sigma}(D^{\gamma}))}}{\sigma_m} = \left(\frac{\sqrt{I_2(D_{\sigma})I_2(D_{\varepsilon})}}{\sigma_m\varepsilon_m}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(9)

$$C_{all} = \left(\frac{\sqrt{I_2(D_{\sigma})I_2(D_{\varepsilon})}}{\sigma_m(D^y)\varepsilon_m(D^y)}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Вариант № 3: учет

обоих факторов

 $\varepsilon_m$  - материальный параметр, определяемый из условия  $C_{\sigma\varepsilon} = C$  при упругом решении

## Связь прочности на одноосное сжатие и упругих модулей

№	соотношение	$E/E_0, \frac{\sigma_{CW}}{\sigma_{CW}}/\sigma_{CW}$	ссылка	
1	$E = (226\sigma_{cx} + 1.22 \ 10^5)98066.5$ песчаники	15.6	Каталог показателей прочности и деформируемости породных образцов угольных месторождений/ Б.В. Матвеев, М.М. Михеева, Ю.М. Карташов и др. Л., изд. ВНИМИ, 1973, 40 с.	
2	$E = 455\sigma_{cm}$	9.51	Тохтуев Г.В., Борисенко В.Г., Титлянов А.А. Физико-механические свойства горных пород Кривбасса. Киев, Госгортехиздат УССР, 1962. 102 с.	
3	$\mathbf{E} = (395\sigma_{\rm cx} + 0.044\ 10^5)98066.5$	8.3	Алтаев Ш.А., Смирнов Л.Н. О некоторых физико-механических свойствах пород Карагандинского угольного бассейна (Саранский участок). – Научные труды Карагандинского научно- исследовательского угольного института. Караганда, вып. 21, 1966, с. 280-289.	
4	$\sigma_{c \kappa} = 2.28 + 4.1089E$ песчаники	1.18		
5	σ <sub>сж</sub> = 7.97 Е <sup>0.91</sup> сланцы	0.37	Chang C., Zoback M.D., Khaksar A. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2006. V. 51. P. 223–237	
6	$\sigma_{c \kappa} = 13.8 E^{0.51}$ известняки	0.63		
7	σ <sub>сж</sub> = 25.1 Е <sup>0.34</sup> доломиты	1.12		
8	$\sigma_{\rm CK} = \frac{122.11E}{39.37 + E}$	0.14	Moradian ZA, Behnia M (2009) Predicting the uniaxial compressive strength and static Young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test. Int J Geomech 9:1–14	
9	$\sigma_{c \pi} = 0.0084E$ песчаники	0.4	Malik MH, Rashid S (1997) Correlation of some engineering geological properties of the Murree formation at lower Topa (Murree district), Pakistan. Geol Bull Univ Peshawar 30:69–81	
10	$\sigma_{\rm CM} = 0.0033 {\rm E} - 2886$	0.15	Deere DU, Miller RP (1966) Engineering classification and index properties for intact rock. Technical Report AFNL-TR-65-116. Albuquerque, USA: Air Force Weapon Laboratory	

### Степень нагружения целика с учетом дефектности

![](_page_18_Figure_1.jpeg)

Рис. 14. Зависимости степени нагружения целика для λ = 1, вычисленные по соотношениям (7) -(10): абсолютные значения (а), относительное изменение (б)

![](_page_18_Figure_3.jpeg)

(б)

Степень нагружения целика с учетом дефектности

![](_page_19_Figure_1.jpeg)

Рис. 15. Зависимости степени нагружения целика для λ = 0.75, вычисленные по соотношениям
(7) -(10): абсолютные значения (а), относительное изменение (б)

![](_page_19_Figure_3.jpeg)

(б)

#### Выводы:

- Из экспериментов по циклическому одноосному сжатию сильвинита с микротомографией образца после каждого цикла определена зависимость деградации касательного модуля от уровня приложенного напряжения.
- 2. Предложены аппроксимационные зависимости нормированного касательного модуля и нормированного коэффициента Пуассона от уровня действующей нагрузки.
- 3. Решена задача оценка степени нагружения целика по эквивалентным напряжениям в его центральной точке для различных форм-факторов и эффективных давлений.
- 4. Показано, что учет деградации модулей слабо сказывается на зависимости степени нагружения целика от эффективного давления.
- 5. Предложены три альтернативных выражения для оценки степени нагружения целика, учитывающих один из или оба фактора: деградация агрегатной прочности с ростом дефектности, изменение эквивалентных деформаций, вызванное уменьшением упругих модулей.
- 6. Показано, что наибольшую поправку дает учет обоих факторов для случая наиболее узкого целика, поправка для условий полной подработки составляет 28%.

![](_page_21_Picture_0.jpeg)