



Горный институт

Лаборатория механики
горных пород



ВТОРАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Разрушение горных пород и минералов»

1-3 апреля 2025 г., Екатеринбург

УПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ

Цаюков Андрей Андреевич, инженер



Предыдущие исследования



Деформирование крупных соляных образцов кубической формы

Схема эксперимента

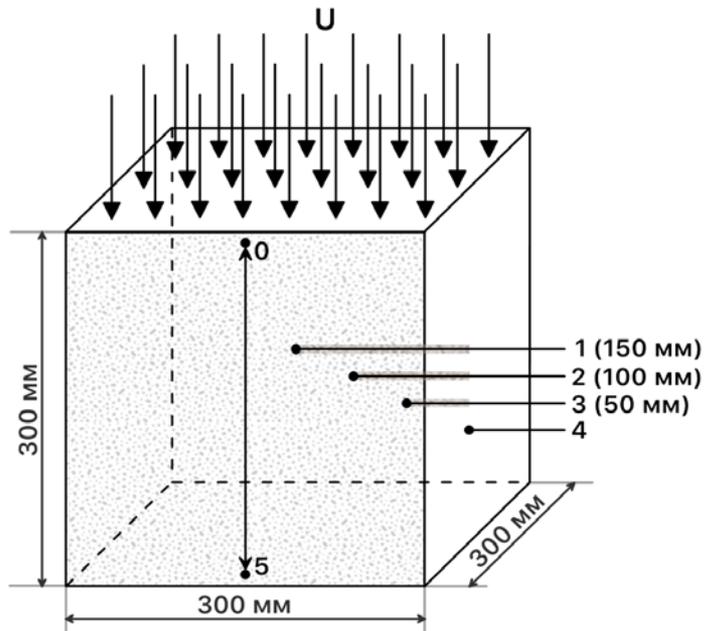
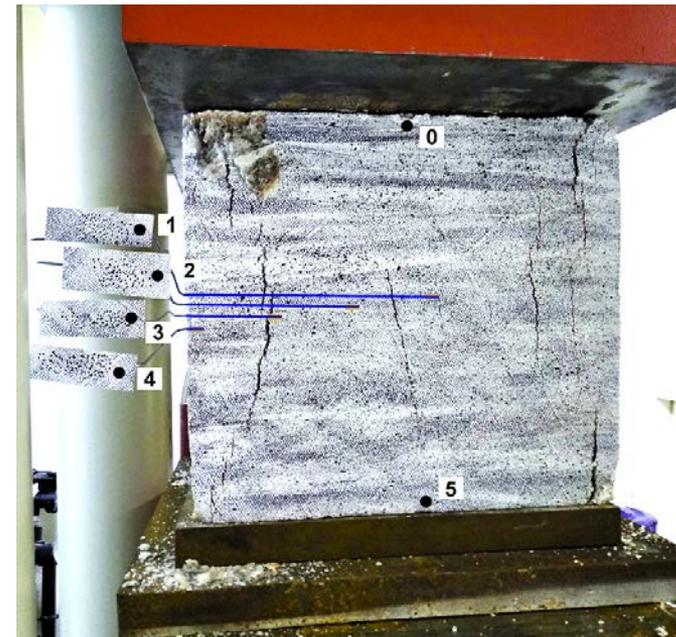


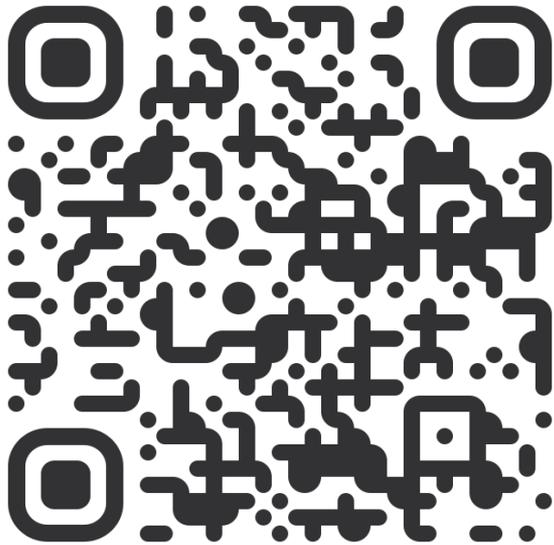
Фото эксперимента



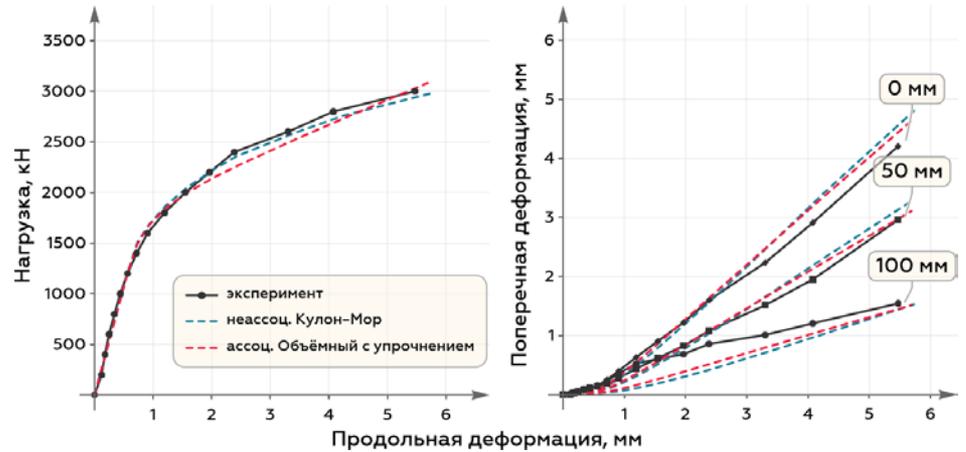
Предыдущие исследования



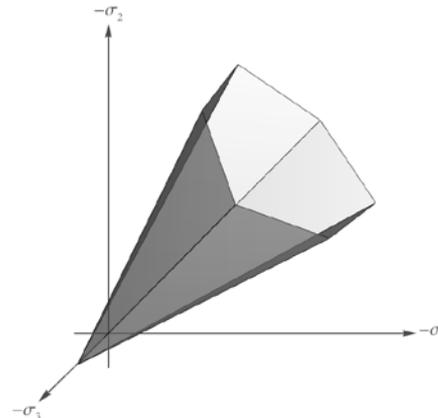
Деформирование крупных соляных образцов кубической формы



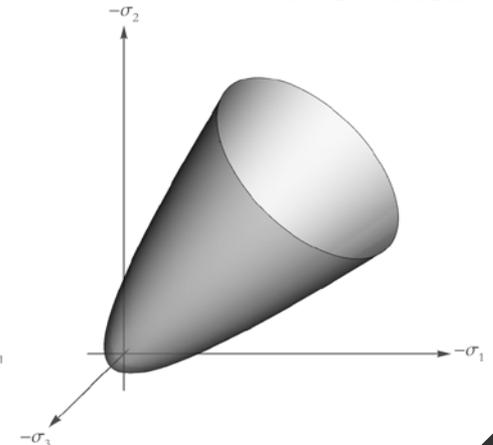
Диаграммы нагружения и деформирования



Кулон-Мор



Объёмный



Предыдущие исследования



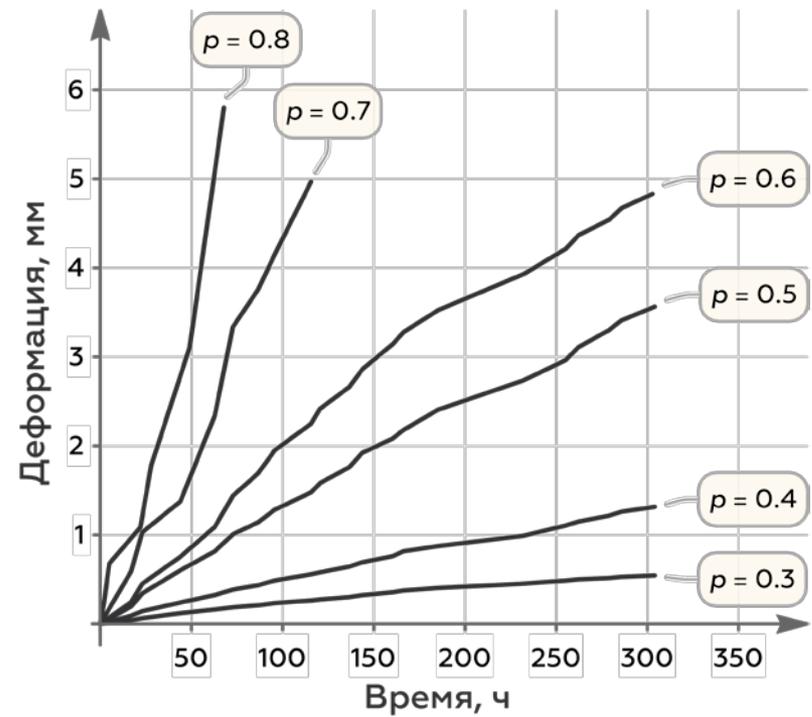
Ползучесть при различных уровнях нагрузки

$$p = \frac{\sigma}{\sigma_c} \quad \text{уровень нагрузки}$$

Образцы красного
сильвинита 60×30×30 мм



Диаграммы
установившейся ползучести

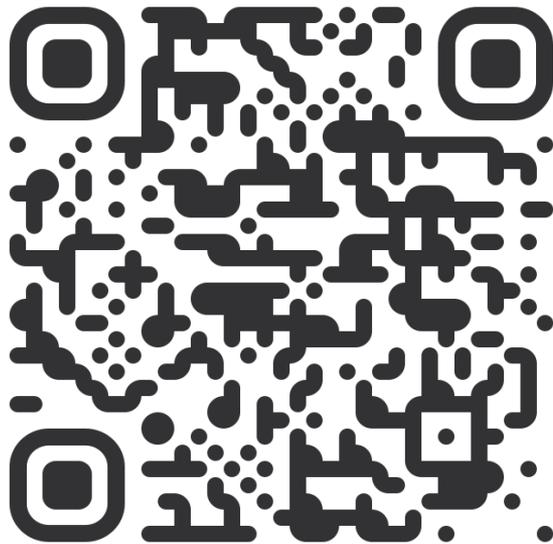


Предыдущие исследования

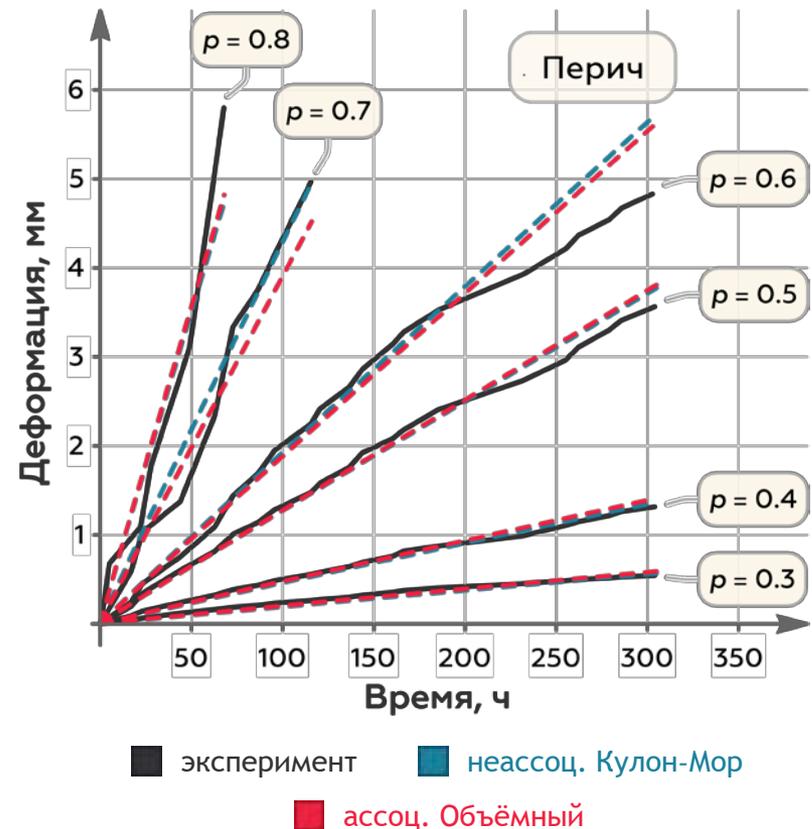


Ползучесть при различных уровнях нагружения

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{\eta} \left[\left(\frac{\sigma_e}{\sigma_y} \right)^{1/m} - 1 \right] \quad \text{закон Перича (Perić's)}$$



Диаграммы установившейся ползучести



Натурные наблюдения

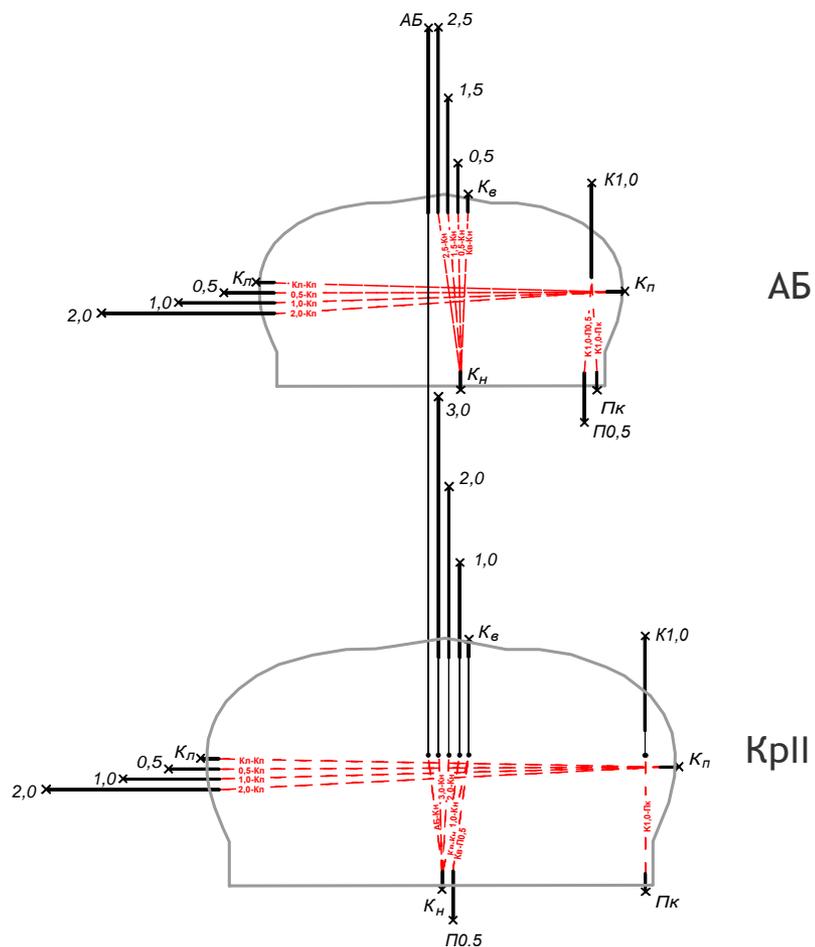
Конструкция замерной станции



Контурный репер



Ленточный экстензометр

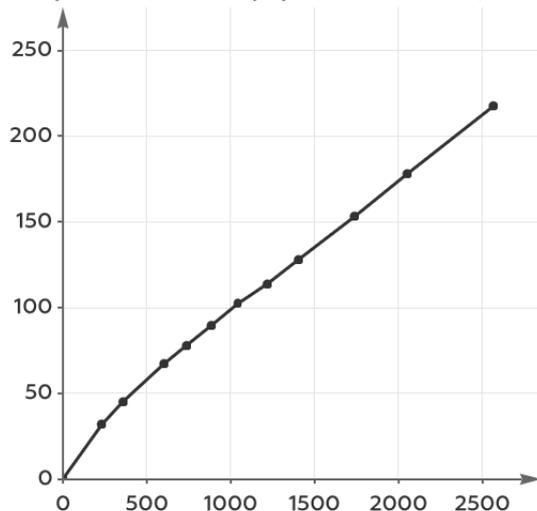


Натурные наблюдения

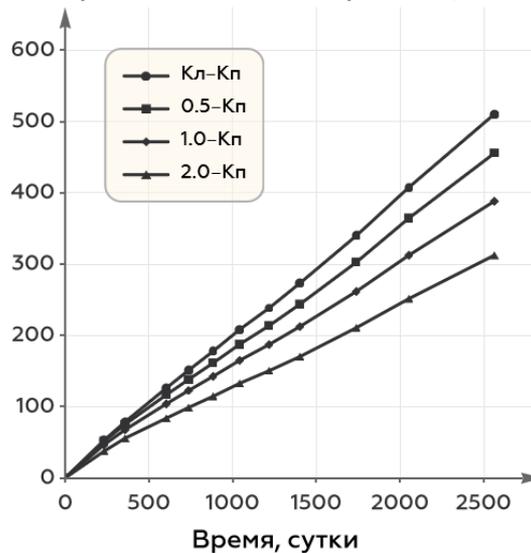


Результаты наблюдений за деформацией камеры пласта КрII

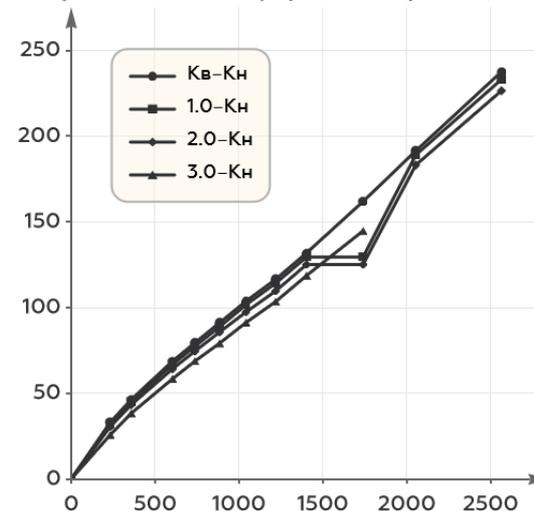
Вертикальная деформация целика, мм



Горизонтальная конвергенция, мм



Вертикальная деформация кровли, мм



Цель исследований



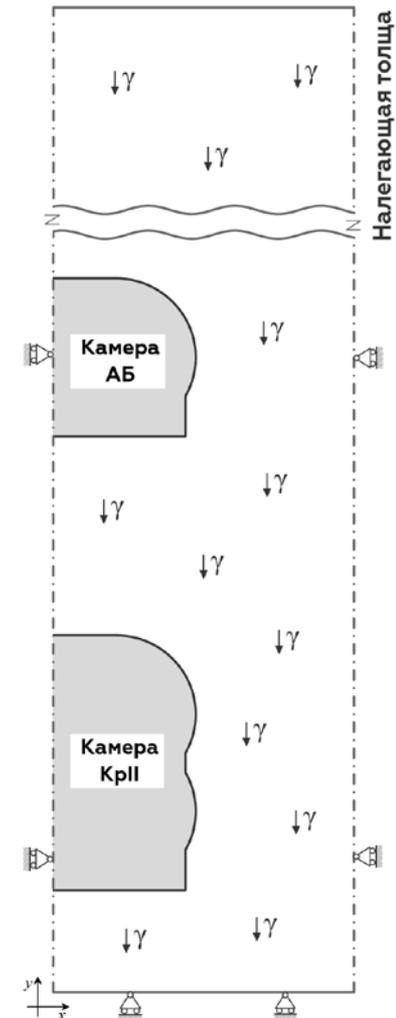
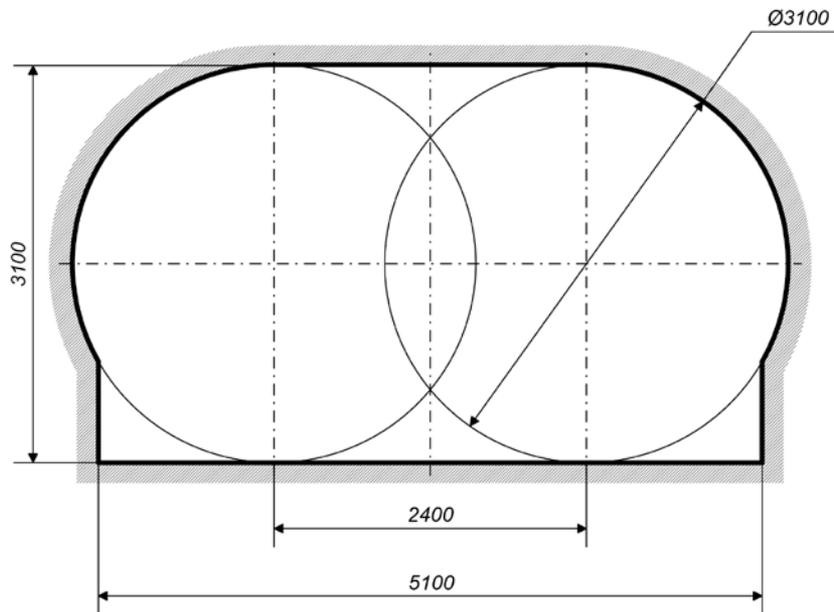
1. Адаптировать упруго-вязкопластическую модель деформирования соляных образцов для условий ПДС
2. Описать результаты натурных наблюдений
3. Использовать критерии пластичности и законы вязкопластичности из предыдущих исследований
 - ассоциированный Объёмный критерий
 - вязкопластический закон Перича

Математическая модель



Принципиальная расчётная схема

*Геометрия сечения выработки,
проходимой комбайном Урал-20Р*



Математическая модель



Изотропная упруго-вязкопластическая модель в варианте ПДС (*матричное представление*)

$$\dot{\sigma} = D^e(\dot{\varepsilon} - \dot{\Theta})$$

закон Гука

$$\dot{\sigma}_z = \nu \boldsymbol{\mu}^T \dot{\sigma} - E \dot{\varepsilon}_z^{in}$$

$$\dot{\Theta} = \dot{\varepsilon}^{in} + \nu \boldsymbol{\mu} \dot{\varepsilon}_z^{in}$$

тензор неупругих деформаций

$$\dot{\varepsilon}^{in} = \dot{\lambda} \frac{\partial \Psi}{\partial \sigma}, \quad \dot{\varepsilon}_z^{in} = \dot{\lambda} \frac{\partial \Psi}{\partial \sigma_z}$$

уравнения развития неупругих деформаций

$$\dot{\lambda} = \begin{cases} f(\sigma, \mathbf{A}, \mathbf{P}), & \Phi(\sigma, \mathbf{A}) > 0, \\ 0, & \Phi(\sigma, \mathbf{A}) \leq 0. \end{cases}$$

уравнение развития вязкопластического множителя

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Математическая модель



Методы и алгоритмы

1. МКЭ в перемещениях

2. Глобальное интегрирование

Автоматическая схема Ньютона-Рафсона с подшагами и контролем ошибки

3. Локальное интегрирование

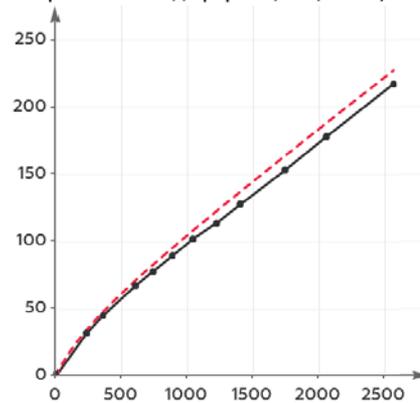
Неявная схема Эйлера алгоритма обратного отображения

4. Калибровка путём варьирования параметров A и P

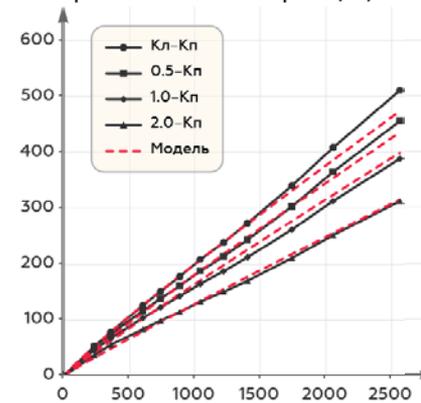
Результаты моделирования



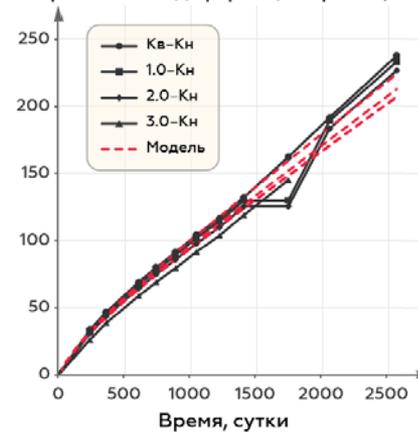
Вертикальная деформация целика, мм



Горизонтальная конвергенция, мм



Вертикальная деформация кровли, мм



■ - разрушение сдвига

■ - разрушение отрыва

Результаты моделирования



Физико-механические свойства

	Удельный вес, 10^4 Н/м^3	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на растяжение, МПа	Коэффициент вязкости, сутки	Скоростное упрочнение
Вышележащая толща	2.2	1	0.3	4	1	10^6	1.0
Пласт КрII	2.2	1	0.3	3	1	$4.8 \cdot 10^5$	1.0
Нижележащая толща	2.2	1	0.3	3	1	$6.5 \cdot 10^5$	1.0

Заключение



1. На основе многовариантного численного моделирования процесса ползучести в камерном блоке показано, что упруго-вязкопластическая модель, базирующаяся на ассоциированном объёмном критерии пластичности и законе вязкопластичности Перича, качественно и количественно описывает характер деформирования междукамерных целиков.
2. Установлено, что для обеспечения требуемых скоростей деформации МКЦ необходимым является существенное снижение предела прочности на сжатие соляных пород, что обуславливает интенсификацию процесса разрушения целиков, которая не соответствует результатам визуальных и инструментальных наблюдений.
3. Вязкопластический закон Перича успешно реализованный при моделировании

ползучести образцов в условиях одноосного сжатия не позволяет адекватно описать процесс разрушения междукамерных целиков. Данный факт может быть связан с тем, что напряженное состояние камерного блока не соответствует одноосному сжатию.