

6. Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Корост Д.В., Дамаскинский К.А. Структурно-энергетические закономерности накопления повреждений при деформировании гетерогенного материала // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63, № 1. – С. 103-109. – DOI: 10.21883/FTT.2021.01.50406.189.
7. Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Кадомцев А.Г., Наймарк О.Б. Влияние состояния внутренних границ раздела на характер разрушения гранита при квазистатическом сжатии // Физика твердого тела. – 2017. – Т. 59, № 5. – С. 920-930. – DOI:10.21883/FTT.2017.05.44381.364.
8. Корост Д.В., Арискин А.А., Пшеницын И.В., Хомяк А.Н. Рентгеновская компьютерная томография как метод реконструкции 3D-характеристик рассеянных сульфидов и шпинелида в плагиодунитах Йоко-Довыренского интрузива // Петрология. – 2019. – Т. 27, № 4. – С. 401-419. – DOI: 10.31857/S0869-5903274401-419.
9. Корост Д.В., Калмыков Г.А., Япаскурт В.О., Иванов М.К. Применение компьютерной микротомографии для изучения строения терригенных коллекторов // Геология нефти и газа. – 2010. – № 2. – С. 36-42.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2022.4.9

## ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬВИНИТА В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

А.А. Ударцев, И.Л. Паньков  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

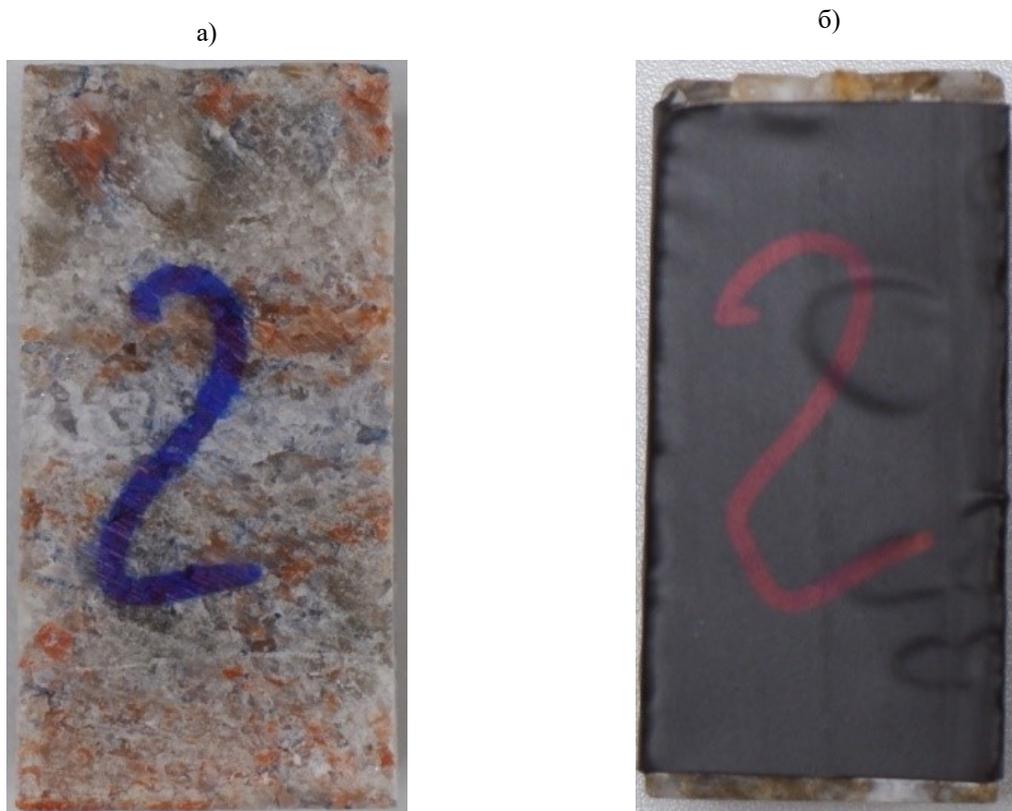
**Аннотация:** Проведены лабораторные испытания при одноосном сжатии сильвинита в режиме ползучести и условно-мгновенного нагружения. Эксперименты на ползучесть осуществлялись при нагрузках составляющих 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7 и 0,8 от предела прочности на одноосное сжатие. Получены полные диаграммы деформирования и кривые ползучести, а также зависимости изменения поперечных деформаций. Установлены отличительные особенности изменения поперечных деформаций при ползучести и условно-мгновенном нагружении.

**Ключевые слова:** условно-мгновенное сжатие, одноосная ползучесть, продольная и поперечная деформация.

Одной из важных задач для обеспечения безопасной отработки Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) является контроль устойчивости элементов камерной системы разработки. В большинстве случаев это решается путём геодезических измерений по сети профильных линий на поверхности и визуального обследования выработанного пространства в шахте. Вместе с тем в ряде случаев требуется получение количественной оценки интенсивности протекающих процессов путём проведения инструментальных измерений деформаций в выработках. Контролирование процессов деформирования подземных горных выработок на рудниках ПАО «Уралкалий» осуществляется с использованием наблюдательных станций, представляющих собой систему контурных и глубинных реперов, закладываемых в кровлю и стенки выработок [1]. Многолетними шахтными измерениями деформаций массива в окрестности очистных камер, проводимыми по контурным и глубинным реперам, установлено, что наиболее информативным показателем, который с высокой степенью надёжности отражает геомеханическую обстановку на участке, является поперечная деформация целиков [2]. С целью более детального изучения процессов деформирования и механизма разрушения междукамерных целиков в поперечном направлении, а так же установления связи между продольной и поперечной деформацией, был проведен комплекс лабораторных испытаний на одноосное сжатие в режиме ползучести и условно-мгновенного нагружения сильвинитовых образцов.

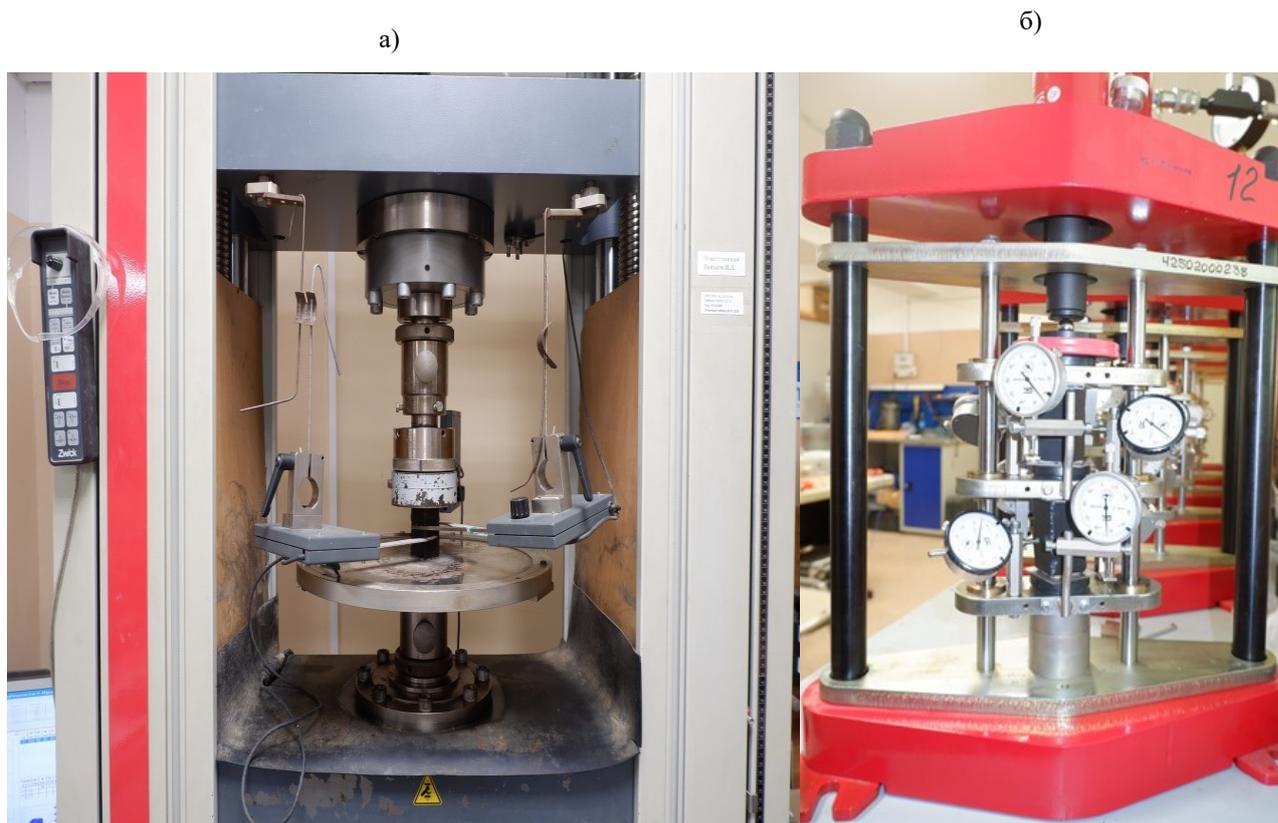
Комплекс лабораторных исследований включал в себя проведение экспериментов на одноосное сжатие в режиме условно-мгновенного нагружения с автоматической регистрацией продольных и поперечных деформаций, а так же изучение характера деформирования сильвинита в режиме длительного одноосного нагружения в поперечном и продольном направлении.

Для выполнения лабораторных исследований из монолита (блока) № 97/3, отобранного из стенки выемочного штрека по пласту Кр II, слой 7, 1 северо-восточной панели шахтного поля рудника ПАО «Уралкалий», изготавливались образцы прямоугольной формы с размерами основания 35×35 мм и высотой 70 мм. Общее количество изготовленных образцов составило 21 шт. Для исключения преждевременного выкрашивания частиц из боковых поверхностей образцов сильвинита в ходе проведения эксперимента и объективности измерения поперечных деформаций, все образцы перед началом испытания помещались в тонкую пластиковую манжету из термоусадочного материала (рис. 1).



**Рис. 1.** Подготовка сильвинитового образца (а) к испытанию с помощью термоусадочной манжеты (б)

Проведение испытаний на одноосное сжатие в режиме условно-мгновенных испытаний осуществлялось на жёстком электромеханическом прессе Zwick/Z250 (предельная нагрузка – 250 кН) при стандартной скорости деформирования – 1 мм/мин. Измерение продольных деформаций осуществлялось по траверсе пресса, а регистрация деформаций в поперечном направлении проводилось с помощью навесных высокоточных датчиков (рис. 2а). Торцевые условия обеспечивались непосредственным контактом образца с плитами пресса в режиме сухого трения. Время проведения одного эксперимента составляло от 3 до 4 минут, завершение эксперимента сопровождалось полной потерей несущей способности сильвинитового образца.

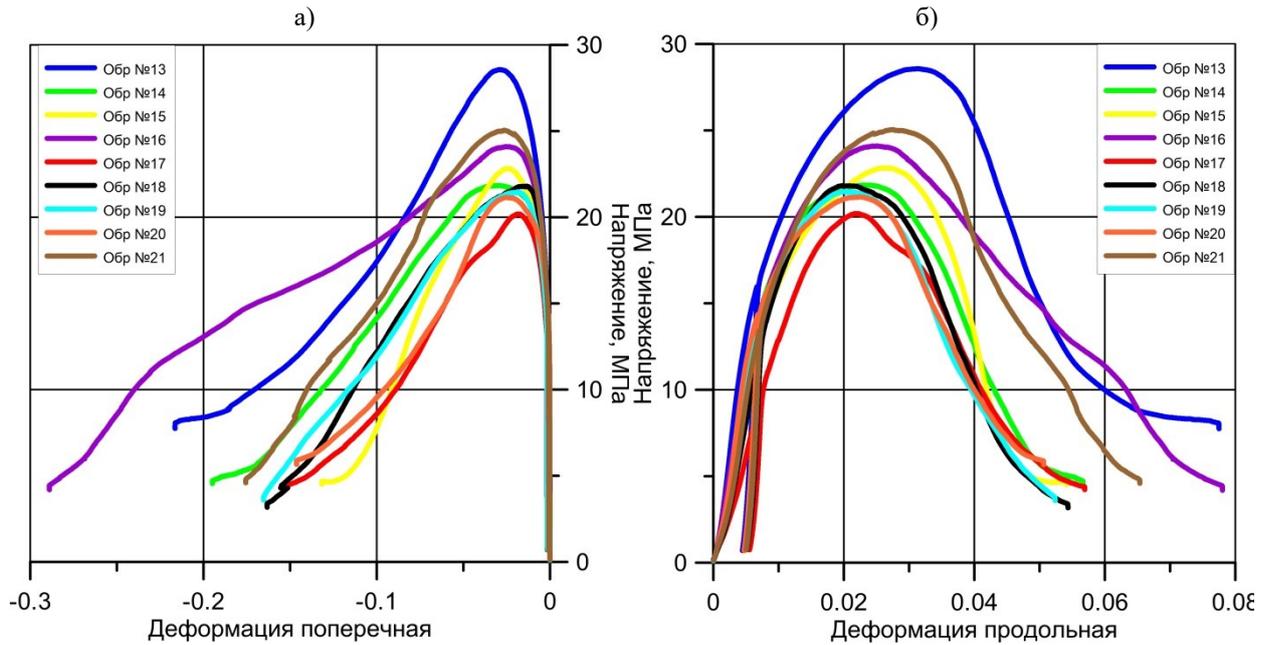


**Рис. 2.** Лабораторное оборудование для проведения испытаний на одноосное сжатие: а – условно-мгновенные испытания; б – испытания на ползучесть

Проведение реологических испытаний при одноосном нагружении осуществлялось с помощью гидравлических прессов фирмы «Энерпред» с максимальным усилием 150 кН. Постоянный уровень нагрузки обеспечивался за счет контроля давления масла в гидравлической системе. Конструкция реологического пресса позволяла испытывать при одном и том же уровне нагружения одновременно два образца. Измерение продольных и поперечных деформаций осуществлялось с помощью индикаторов часового типа, с точность измерения 0,01 мм. В целях исключения перекосов индикаторы для измерения продольных деформаций располагались симметрично относительно длинной оси образца, а для измерения поперечных деформаций – относительно короткой оси. Общий вид установки на ползучесть с расположением всех датчиков представлен на рис. 2б.

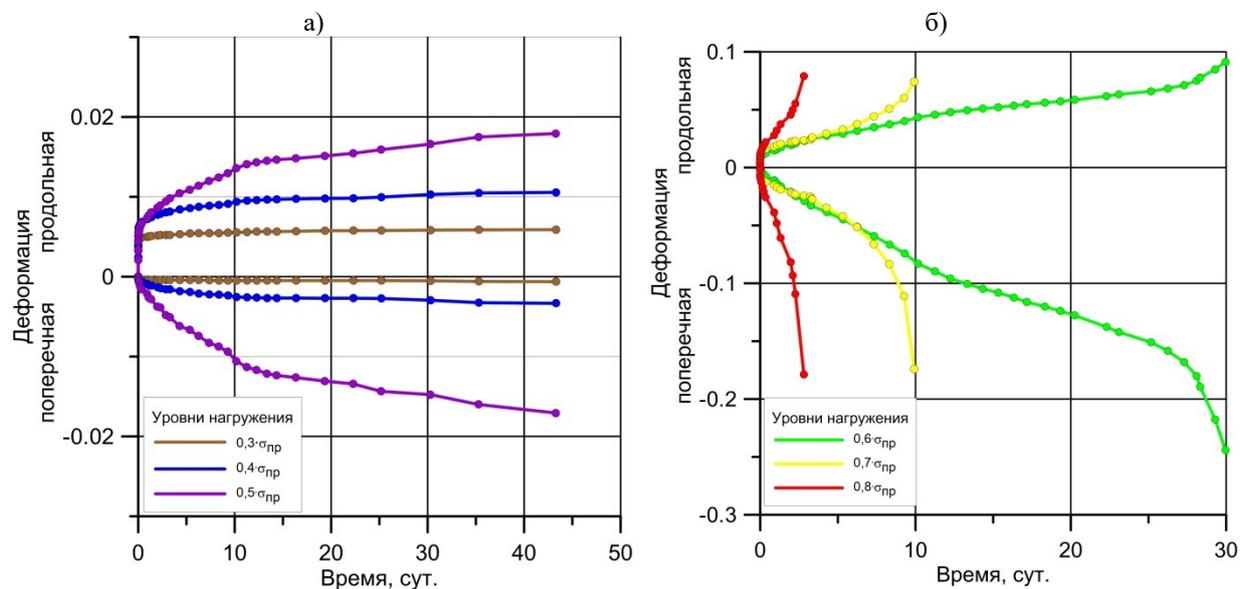
Регистрация и занесение деформаций в журнал происходило через возрастающие промежутки времени: первые сутки – 30 мин, 1 час, 2 часа, 3 часа; вторые сутки – 2 раза (утром и вечером). В последующем контроль деформаций проводился один раз в сутки, на стадии затухающей ползучести регистрация – один раз в несколько суток. Эксперименты на ползучесть осуществлялись при разных уровнях нагрузки – 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 и 0,8 от средней величины предела прочности на сжатие ( $\sigma_{пр}$ ). Время эксперимента в зависимости уровня нагрузки составляло от 3 до 43 суток.

По результатам испытаний на условно-мгновенное сжатие строились полные диаграммы деформирования в координатах «нагрузка – продольная деформация» и «нагрузка – поперечная деформация». Общее количество испытанных образцов на одноосное сжатие составило 9 шт. Ниже на рис. 3 представлены графики нагружения в зависимости от изменения продольных и поперечных деформаций.



**Рис. 3.** Графики нагружения сильвинита в зависимости от изменения поперечных (а) и продольных (б) деформаций

По результатам длительных испытаний строились кривые ползучести при различных уровнях нагружения в координатах «время – продольная деформация» и «время – поперечная деформация». Общее количество испытанных образцов в режиме ползучести составило 12 шт. Характерные кривые ползучести сильвинита при одноосном нагружении для продольных и поперечных деформаций представлены на рис. 4.



**Рис. 4.** Графики изменения продольных и поперечных деформаций во времени при ползучести сильвинита для различных уровней нагружения:  
 а)  $0,3\sigma_{пр}$ ;  $0,4\sigma_{пр}$ ;  $0,5\sigma_{пр}$ ; б)  $0,6\sigma_{пр}$ ;  $0,7\sigma_{пр}$ ;  $0,8\sigma_{пр}$

Анализ полученных результатов в ходе проведения испытаний на условно-мгновенное сжатие позволил сделать вывод, что поперечные деформации на запре-

дельной стадии деформирования значительно превосходят продольные, что объясняется интенсивным трещинообразованием в образце.

В ходе проведения длительных испытаний сильвинитовых образцов установлено, что на высоких уровнях нагружения ( $0,6\sigma_{пр}$ ;  $0,7\sigma_{пр}$ ;  $0,8\sigma_{пр}$ ), интенсивность деформирования в поперечном направлении резко увеличивается по отношению к продольным деформациям.

Для изучения характера деформирования сильвинитовых образцов, а так же установления связи между продольной и поперечной деформацией были построены эмпирические зависимости в координатах «поперечная деформация – продольная деформация» как для условно-мгновенных, так и для длительных испытаний. Пример изменения поперечных деформаций от продольных при условно-мгновенном сжатии представлен на рис. 5, для длительного нагружения – на рис. 6.

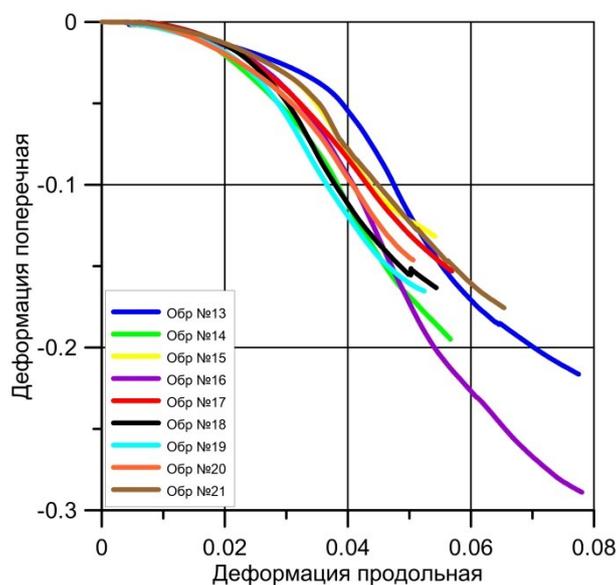


Рис. 5. Характер изменения поперечных деформаций от продольных при условно-мгновенном сжатии

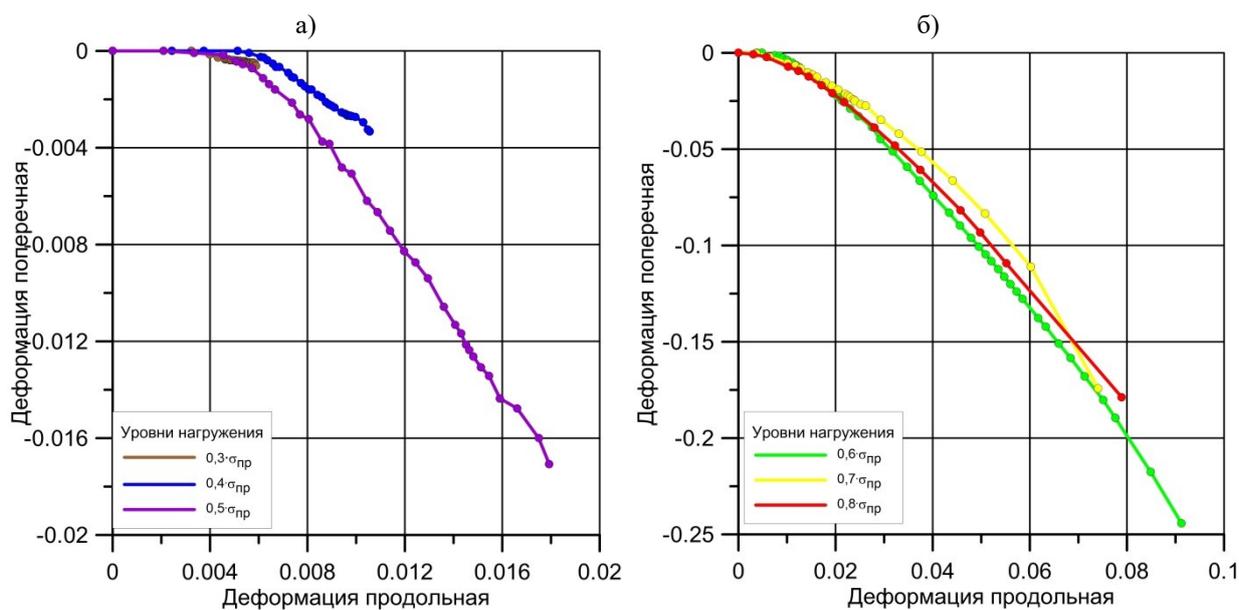


Рис. 6. Характера изменения поперечных деформаций от продольных при длительном нагружении: а) уровни нагружения  $0,3$ ;  $0,4$ ;  $0,5$ ; б) уровни нагружения  $0,6$ ;  $0,7$ ;  $0,8$

Анализ полученных результатов позволил установить, что зависимости поперечных деформаций от продольных при длительном нагружении имеют вид, близкий к параболическому, что не наблюдается при условно-мгновенном сжатии, где аналогичные зависимости имеют форму, близкую к S-образной. Данное различие, по всей видимости, вызвано эффектом консолидации, наиболее ярко проявляющимся при длительном нагружении нарушенных сильвинитовых пород. Так же по результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что в ряде случаев величина поперечных деформаций является достаточно информативным показателем, показывающим качественную картину о характере изменения состояния соляных междукамерных целиков, работающих в условиях ВКМКС.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000403-1), а также РФФИ и Пермского края по гранту № 19-45-590004.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л. Особенности поведения кровли выработок на южном фланге Верхнекамского месторождения калийных солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 1. – С. 84-88.
2. Евсеев А.В. Методика инструментального контроля процессов деформирования камерного блока при двухпластовой отработке сильвинитовых пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 105-107.

УДК 539.4+519.6+ 622.83

DOI:10.7242/echo.2022.4.10

## О ПРИМЕНЕНИИ НЕКОТОРЫХ КЛАССИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ СОЛЯНЫХ ОБРАЗЦОВ

А.А. Цаюков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Исследование процессов деформирования и разрушения соляных пород является неотъемлемой частью обоснования параметров подземной разработки месторождений минеральных солей. Результаты испытаний крупномасштабных образцов соляных пород при одноосном сжатии представлены в виде диаграммы нагружения и зависимости поперечных перемещений от продольных на различных расстояниях от боковых граней. На основе изотропной упругопластической модели выполнено многовариантное численное моделирование, целью которого являлась проверка возможности использования классических критериев прочности для описания процесса деформирования соляного образца. Рассмотрены такие критерии разрушения, как Треска в варианте ассоциированного пластического течения и Кулона-Мора с ассоциированным и неассоциированным пластическим течением. Численная реализация математического моделирования осуществлялась методом конечных элементов в перемещениях. Установлено, что в рамках упругопластической модели среды процесс деформирования при одноосном сжатии крупномасштабного соляного образца кубической формы адекватно описывается только при применении критерия прочности Кулона-Мора и неассоциированного закона пластического течения.

**Ключевые слова:** соляные породы, упругопластическая модель, критерии прочности, математическое моделирование, метод конечных элементов.