

# ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУЗОНЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕРНОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ \*

И.Л. Паньков, *Горный институт УрО РАН*

В.В. Аникин, *Горный институт УрО РАН*

Н.Л. Бельтюков, *Горный институт УрО РАН*

А.В. Евсеев, *Горный институт УрО РАН*

В.С. Кузьминых, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

И.С. Ломакин, *Горный институт УрО РАН*

И.А. Морозов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

В.Н. Токсаров, *Горный институт УрО РАН*

А.А. Ударцев, *Горный институт УрО РАН*

---

## Для цитирования:

Паньков И.Л., Аникин В.В., Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В., Кузьминых В.С., Ломакин И.С., Морозов И.А., Токсаров В.Н., Ударцев А.А. Изучение деформирования и разрушения соляных пород для разработки методов геомеханической оценки устойчивости грузонесущих элементов камерной системы разработки калийных месторождений // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2022. – № 3. – С. 14–24. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.3.2>

---

Выполнен комплекс исследований, направленных на разработку методов оценки устойчивости междукамерных целиков, применяемых в условиях ВКМКС.

Проведены натурные измерения деформаций массива в окрестности очистных камер по контурным и глубинным реперам. Установлено, что наиболее информативным показателем, отражающим геомеханическую обстановку на подземном участке месторождения калийных солей, является поперечная деформация целиков.

Для оценки нормативных скоростей деформирования междукамерных целиков выполнены лабораторные исследования по изучению деформирования соляных образцов под действием постоянной нагрузки в режиме ступенчатого нагружения, а также определение продольных и поперечных деформаций при сжатии образцов большого размера.

В рамках разработки метода расчета эквивалентной прочности междукамерных целиков проведен комплекс экспериментальных исследований на слоистых цементно-песчаных образцах.

---

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-45-590004.

С целью выявления влияния протяженности междукамерных целиков на их устойчивость проведены экспериментальные исследования коэффициента формы на прямоугольных образцах сильвинита различной длины.

Для учета фактора времени на устойчивость и деформируемость пород кровли подземных выработок выполнены экспериментальные исследования ползучести соляных пород при одноосном ступенчатом растяжении.

В рамках решения задачи по переносу результатов экспериментального определения физико-механических показателей горных пород на натурный уровень выполнены теоретические и экспериментальные исследования по изучению масштабного эффекта в соляных породах в условиях одноосного сжатия.

*Ключевые слова:* месторождение калийных солей, камерная система разработки, междукамерный целик, поперечная деформация, скорость деформирования, эквивалентная прочность, коэффициент формы, ползучесть при одноосном растяжении, масштабный фактор.

Развитие геомеханики, базирующейся на значительном экспериментальном и теоретическом материале по поведению горных пород под нагрузкой, позволило решить значительный круг проблем по безопасному ведению горных работ [1–4]. Исследования ведущих зарубежных и отечественных ученых показали, что существуют значительные различия в поведении скальных и полускальных горных пород (к которым, в первую очередь, относятся соляные геоматериалы) при мгновенном и длительном действии приложенной нагрузки [5–8]. В то же время механизмы деформирования и накопления повреждений в горных породах [9], находящихся под действием длительных нагрузок, практически не изучены. Применительно к геомеханике рассмотрены только некоторые аспекты, связанные, в первую очередь, с определением длительной прочности горных пород при сжатии, а также испытанием на ползучесть в режиме одноосного сжатия [10]. Отсутствие результатов по изучению механизмов разрушения при различных схемах нагружения, в особенности при испытаниях на прямое растяжение, было связано с отсутствием высокоточного испытательного и регистрирующего оборудования. В настоящее время, с появлением нового класса жесткого испытательного оборудования, основанного на применении компьютерных технологий, с

использованием высокоточных датчиков деформаций контактного и бесконтактного типов, открываются новые возможности в проведении исследований по изучению особенностей деформирования соляных горных пород при различных режимах и схемах нагружения [11].

Все вышеперечисленные вопросы в полной мере относятся к геомеханическому обеспечению безопасных условий ведения горных работ при разработке месторождений калийных солей, в частности – поддержанию устойчивости грузонесущих элементов камерной системы разработки. В качестве примера необходимо привести события на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС), где в результате постепенного разрушения поддерживающих целиков произошло критическое деформирование и нарушение сплошности водозащитной толщи, защищающей продуктивные пласты от проникновения пресных вод из вышележащих водоносных горизонтов. В результате произошло затопление рудников БКПРУ-3 (1986 г.) и БКПРУ-1 (2006 г.). В этой связи в рамках разработки методов оценки устойчивости конструктивных элементов камерной системы разработки месторождений калийных солей актуальной является задача изучения закономерностей деформирования и разрушения соляных пород в различных условиях.

За время эксплуатации ВКМКС на шахтных полях рудников ПАО «Уралкалий» образовались большие выработанные пространства, составляющие десятки квадратных километров, которые продолжают увеличиваться. В настоящее время на месторождении в полной мере организованы только два вида мониторинга выработанного пространства: маркшейдерский и сейсмологический. Актуальным является вопрос организация геомеханического мониторинга деформационных процессов приконтурного массива, а также определение критериальных зависимостей разрушения соляных пород на основе современных инструментальных методов контроля, позволяющих принимать решение о необходимости проведения закладочных работ или других мерах охраны.

Многолетними шахтными и лабораторными исследованиями установлено, что наиболее физически обоснованными являются деформационные критерии разрушения, дающие возможность достаточно надежно фиксировать стадию предразрушения приконтурного массива. Измерениями деформаций массива в окрестности очистных камер, проводимыми по контурным и глубинным реперам (рис. 1), установлено, что наиболее информативным показателем, который с высокой сте-

пенью надёжности отражает геомеханическую обстановку на участке, является поперечная деформация целиков [12].

Одним из важных вопросов при проведении инструментального контроля устойчивости междукамерных целиков на основе деформационных критериев является определение нормативной скорости относительного поперечного деформирования. Прямое определение критических величин, соответствующих переходу целиков в стадию прогрессирующей ползучести, в натуральных условиях невозможно по причине отсутствия экспериментальных участков с требуемыми для эксперимента условиями. Предварительные оценки, выполненные методами математического моделирования, показали, что при увеличении скорости поперечного деформирования целиков до 50 мм/м в год происходит резкое снижение несущей способности целиков и их переход в стадию прогрессирующей ползучести [13].

В целях оценки нормативных скоростей деформирования междукамерных целиков выполнены лабораторные исследования по определению скорости продольного деформирования соляных образцов под действием постоянной нагрузки в режиме ступенчатого нагружения (рис. 2). Испытание осуществлялось на образцах кубической формы с разме-

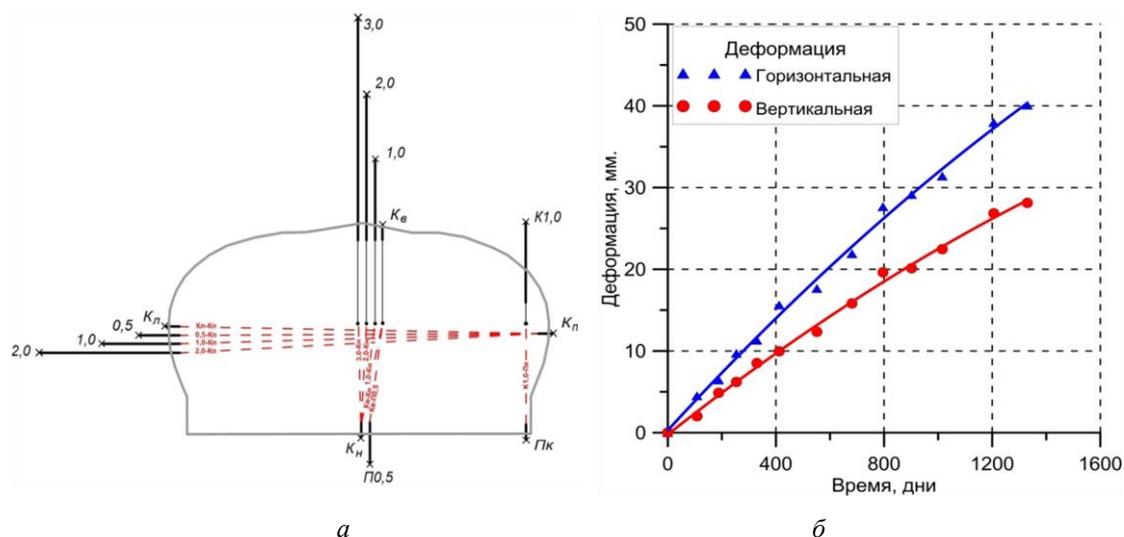
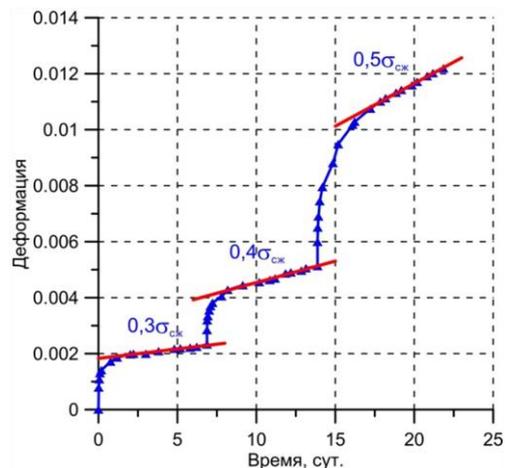


Рис. 1. Мониторинг деформирования подземных горных выработок: а – система глубинных и контурных реперов; б – пример изменения горизонтальных и вертикальных смещений контура выработки



а



б

Рис. 2. Исследование ползучести соляных пород в режиме ступенчатого нагружения: а – проведение эксперимента; б – результаты определения скорости установившейся ползучести для разных ступеней нагружения

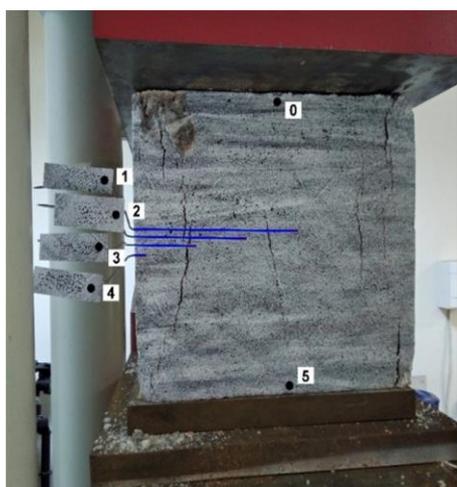
рами 50×50×50 мм. Степень нагружения составляла от 0,3 до 0,7 от предела прочности на одноосное сжатие. Для получения скорости установившейся ползучести время выдержки образцов на каждой ступени составляло от 7 до 15 суток.

По результатам испытаний определена скорость установившейся ползучести образцов в зависимости от степени нагружения. Экспериментально установлено, что переход на последующую ступень нагружения (увеличение нагрузки на образец на 0,1 от среднего предела прочности на сжатие) сопровождается увеличением скорости установившейся ползучести

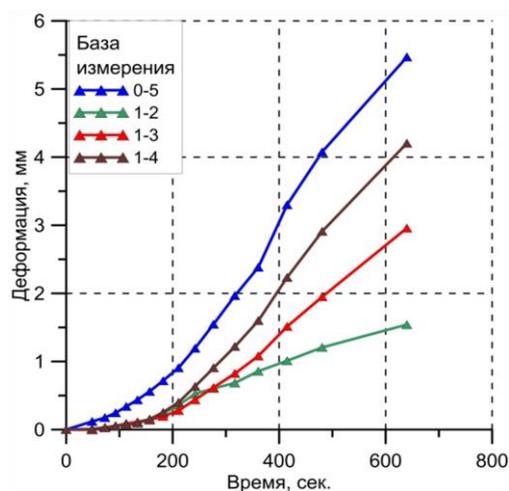
приблизительно в 3 раза.

Для получения соотношений между продольной и поперечной деформациями, а также распределения поперечных деформаций по сечению образца, проведены испытания на одноосное сжатие образцов кубической формы большого размера 300×300×300 мм (рис. 3). Для изучения поперечного расслоения внутри образца на различном удалении от контура закреплялись глубинные марки. Испытания проводились на гидравлическом прессе ToniNorm(5 000 кН).

Испытания образцов большого размера показало, что их деформирование идёт



а



б

Рис.3. Испытание на сжатие образцов большого размера: а – проведение эксперимента; б – результаты смещения глубинных марок с различной базой измерения

равномерно по сечению, при переходе в запредельную стадию деформирования соотношение поперечных деформаций к продольным составляет около 1,3. Так же определена зависимость поперечной деформации образцов от степени нагружения. Полученные в ходе лабораторных исследований данные удовлетворительно согласуются с результатами математического моделирования. Увеличение степени нагружения выше допустимой, согласно [14], сопровождается увеличением скорости поперечного деформирования до 50–100 мм/м в год. Инструментальные измерения горизонтальных смещений контура выработок свидетельствуют о том, что на большинстве контролируемых участков наиболее интенсивно деформируются выработки нижнего обрабатываемого пласта, при этом деформации в кровле и целиках верхнего пласта практически полностью отсутствуют. Частично это может быть связано с различием высоты и формы оставаемых целиков. В ходе сопоставления скорости поперечной деформации целиков различной высоты и формы установлено, что при равных расчётных степенях нагружения наиболее интенсивно деформируются высокие целики, с меньшим соотношением ширины к высоте.

Одной из задач сохранения устойчивости междукамерных целиков, оставляемых при отработке калийных месторождений, является оценка эквивалентной прочности слоистого целика, являющейся базовым показателем при выборе параметров камерной системы разработки. В [14] для расчета эквивалентной прочности применяется формула гармонического средневзвешенного, записанная в виде

$$\sigma_0 = \frac{m}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\sigma_{ci}}}$$

где  $m$  – расчетная высота междукамерного целика;  $m_i$  – мощность  $i$ -го слоя породы ( $i=1, 2 \dots n$ );  $n$  – количество слоев разнородных пород, слагающих междукамерные целики в пределах их расчетной высоты  $m$ ;  $\sigma_{ci}$  – расчетная прочность при

сжатии стандартных образцов (с отношением высоты к ширине, равном двум)  $i$  – го слоя породы.

В рамках изучения механизмов разрушения, а также построения новых эмпирических зависимостей расчета эквивалентной прочности междукамерных целиков проведен комплекс модельных экспериментальных исследований на слоистых цементно-песчаных образцах, изготовленных методом «сплошной заливки». По предложенной методике были изготовлены двухслойные и трехслойные образцы, состоящие из прочных и слабых слоев.

Лабораторные испытания на сжатие проводились на электромеханическом прессе Zwick/Z250 (250 кН). По результатам эксперимента строились полные диаграммы деформирования, по которым определялись прочностные параметры составных образцов, так же рассчитывалась теоретическая прочность слоистых образцов по формуле гармонического средневзвешенного. При анализе результатов наблюдалась тенденция уменьшения прочности цементно-песчаных слоистых образцов с увеличением толщины слабого слоя; полученные выводы удовлетворительно согласуются с результатами зарубежных ученых, занимавшихся изучением данного вопроса на композитных образцах [15, 16]. По осредненным результатам экспериментальных и расчетных данных были построены зависимости влияния толщины слабого слоя на прочность слоистых образцов (рис. 4). Анализ полученных кривых показал, что как для двухслойных составных образцов, так и для трехслойных экспериментальные значения предела прочности ниже расчетных, что, по всей видимости, свидетельствует о более сильном влиянии слабых слоев по сравнению с прочным на рассматриваемый механический показатель.

С целью изучения характера деформирования и механизма разрушения слоистых образцов часть испытаний на одноосное сжатие проводились с применением бесконтактной трехмерной оптической системы Vic-3D (рис. 5, а), позволяющей

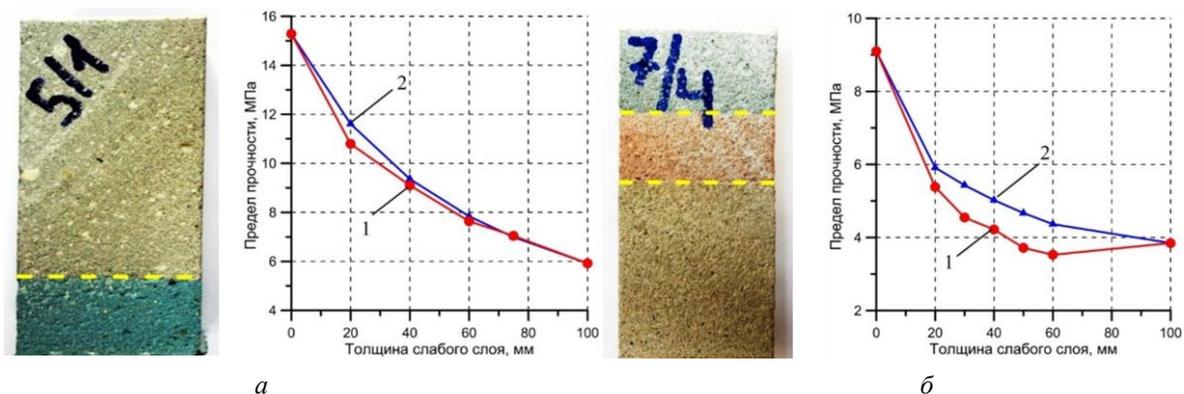


Рис. 4. Влияние толщины слабого слоя на изменение прочности цементно-песчаных образцов:  
 а – двухслойные образцы; б – трехслойные образцы  
 (1 – экспериментальные данные, 2 – формула гармонической средневзвешенной)

не только получать комплекс деформационных показателей по всей поверхности образца, но и выявлять зоны с более ослабленными прочностными свойствами до появления видимых трещин [17]. Установлено, что интенсивность развития как поперечных, так и продольных деформаций приходилась на более слабый слой и далее сопровождалась развитием трещин, распространявшихся на весь образец. На рис. 5, б, в, представлен пример построения полей деформаций для двухслойных образцов при одноосном нагружении в момент времени, соответствующий пределу прочности.

Для оценки несущей способности целиков, оставляемых при камерной системе

разработки, применяемой на рудниках ВКМКС, используют коэффициент формы, который определяется на образцах с различным отношением высоты к ширине в лабораторных условиях [7, 14]. Несмотря на значительное количество предложенных уравнений [18, 19], известные зависимости определения коэффициента формы не включают в свое математическое выражение влияние протяженности целиков, что может приводить к существенным погрешностям оценки несущей способности поддерживающих элементов подземных конструкций, влияющей как на безопасность ведения горных работ, так и на коэффициент извлечения полезных ископаемых. С целью разработки нового ко-

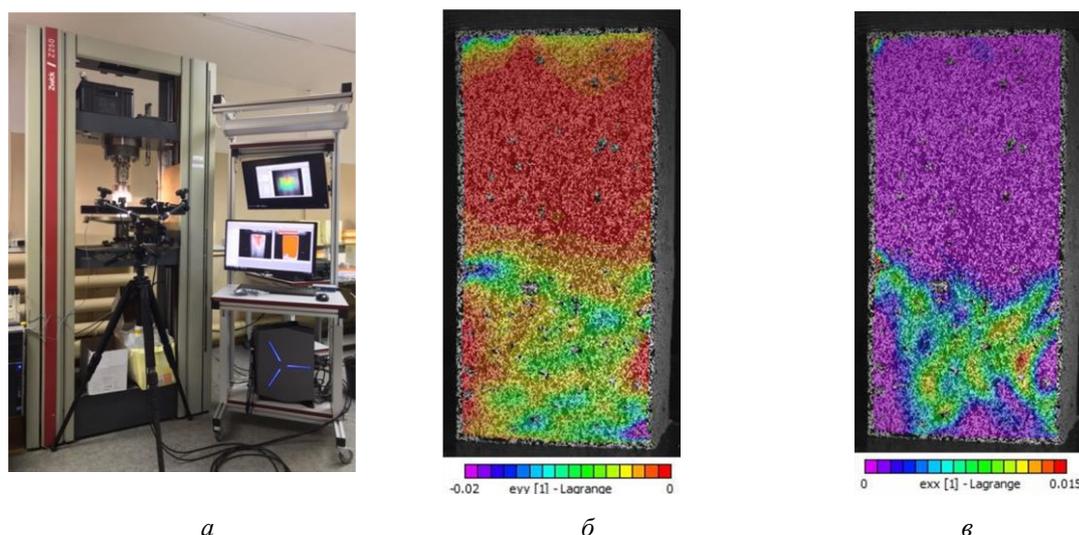


Рис. 5. Построение полей деформаций при сжатии слоистых образцов:  
 а – оптическая система Vic-3D; б – поле продольных деформаций; в – поле поперечных деформаций (пунктирной линией показаны границы разнопрочных слоев)

эфициента формы, учитывающего фактор протяженности поддерживающих це-ликот при определении параметров камерной системы разработки калийных рудников, работающих в условиях ВКМКС, проведен комплекс экспериментальных исследований на прямоугольных образцах сильвинита различной длины. Размеры образцов составляли: ширина ( $a$ ) – 35 мм, высота ( $h$ ) – 35 и 70 мм, длина ( $l$ ) – 35, 70, 140 и 210 мм. Пример изготовленных образцов сильвинита различной длины приведен на рис. 6, а.

Эксперименты по определению предела прочности на сжатие сильвинитовых образцов различной длины проводились на электромеханическом прессе Zwick/400 (400 кН) в режиме контролируемого деформирования. По результатам экспериментов на одноосное сжатие строились полные диаграммы деформирования, используемые для определения полного комплекса прочностных и деформационных показателей. Значения предела прочности использовались для определения коэффициента формы образцов произвольного размера. Характер влияния относительной длины образца ( $l/a$ ) на осредненный коэффициент формы приведен на рис. 6, б. Анализ результатов проведенных исследований позволил установить, что с увеличением длины об-

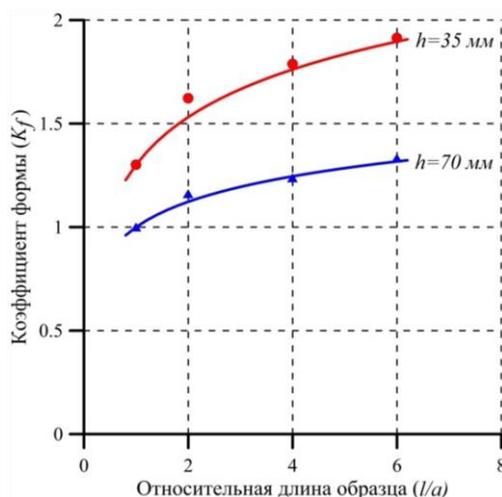
разца коэффициент формы возрастает, при этом интенсивность роста коэффициента формы уменьшается с увеличением высоты и длины образца.

Одной из сложных проблем геомеханики при решении вопросов обеспечения безопасного ведения подземных горных работ на месторождениях полезных ископаемых является учет фактора времени на устойчивость и деформируемость конструктивных элементов камерной системы разработки и пород приконтурного массива [10]. В связи с тем, что безопасность ведения горных работ в значительной степени определяется состоянием пород кровли выработок, находящихся под действием растягивающих вертикальных напряжений, актуальными являются исследования направленные на изучение особенностей ползучести соляных пород под действием растягивающих усилий.

Экспериментальное изучение ползучести соляных пород при одноосном растяжении проводились в режиме ступенчатого приложения нагрузки на образцах соляных пород прямоугольной формы (длина – 250 мм, сечение – 50×50 мм). Эксперименты проводились на универсальной электромеханической машине Zwick 050 (50 кН), позволяющей поддерживать режим ползучести с одновременным измерением деформаций. Для исключения



а



б

Рис. 6. Экспериментальное изучение влияния длины образца на коэффициент формы: а - изготовленные образцы сильвинита; б - характер изменения коэффициента формы прямоугольных образцов сильвинита различной высоты в зависимости от длины

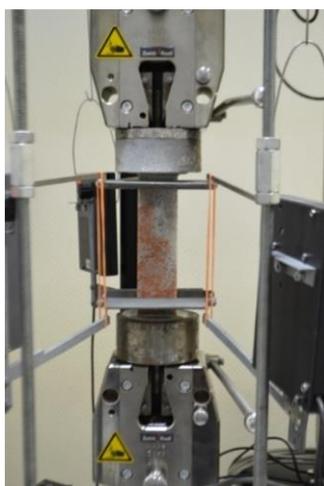
концевых эффектов, связанных с низкой контактной прочностью солей, перед испытанием проводилась подготовка образца, заключающаяся в его цементации в специальных металлических матрицах. Для создания прочного контакта «образец-матрица» использовался магнезиальный цемент, затворенный на растворе бисшофита. Фиксация матриц осуществлялась в клиновых зажимах испытательной машины. Измерение продольных деформаций осуществлялось на поверхности образца с помощью трех выносных датчиков, располагаемых по схеме равностороннего треугольника, что позволяло компенсировать перекосы в различных плоскостях, а также увеличить базу измерения. Контакт «датчик-образец» осуществлялся с помощью пластин, закрепленных на поверхности образца (рис. 7, а).

Уровень нагрузки каждой ступени составлял 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 и 1,2 МПа, с длительностью 24 часа. По результатам испытаний строились семейства кривых ползучести (рис. 7, б).

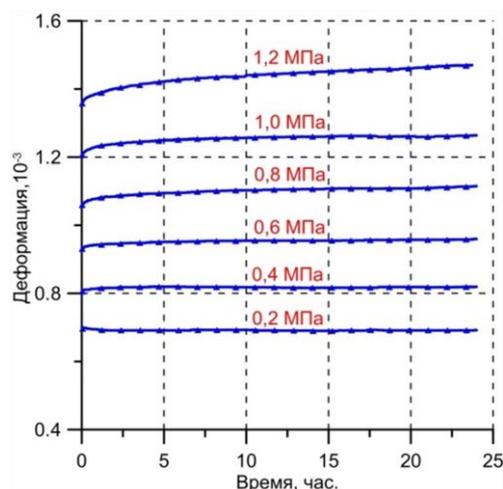
В результате проведенных испытаний у образцов выявлена тенденция уменьшения мгновенной деформации и увеличения деформации ползучести на каждой ступени возрастания растягивающей нагрузки. Из-за ограничения по времени испытаний на каждой стадии эксперимента полученные результаты включали облас-

ти неустановившейся и начало установившейся ползучести. В этой связи дальнейшее изучение ползучести пород при одноосном растяжении должно быть направлено на увеличение времени испытаний с целью регистраций всех стадий деформирования, включая стадию прогрессирующей ползучести.

Одной из задач, возникающих при геомеханическом обосновании безопасных условий ведения горных работ на рудниках месторождений калийных солей, является перенос результатов экспериментального определения физико-механических показателей горных пород, полученных в лабораторных условиях на натуральный (шахтный) уровень [14]. В рамках решения данной задачи одним из основных вопросов являются проявления масштабного эффекта при сжатии квазипластичных соляных пород, заключающиеся в изменении прочностных, деформационных и энергоемкостных показателей с увеличением размера образца. Анализ проведенных экспериментальных исследований позволил выявить, что для квазипластичных соляных пород основным является масштабный эффект второго рода (поверхностный масштабный эффект), механизм проявлений которого основан на влиянии деструктивного высокопластичного поверхностного слоя, образующегося при изготовлении образцов.



а



б

Рис. 7. Исследование ползучести образцов соляных пород в режиме ступенчатого растяжения: а – проведение эксперимента; б – кривые ползучести

Установлено, что поверхностный масштабный эффект формируется при совместном влиянии следующих факторов:

- появление дополнительной деформации образца за счет уплотнения деструктивного слоя (деформационный фактор);

- снижение действующей нагрузки на образец, обусловленное уменьшением площади поперечного сечения внутренней ненарушенной части породного образца (силовой фактор);

- изменение энергоёмкости разрушения образца за счет появления дополнительной работы, затрачиваемой на развитие дефектов, инициируемых нарушениями деструктивного слоя (энергетический фактор).

Для описания проявлений поверхностного масштабного эффекта в квазипластичных породах использовался метод построения теоретических диаграмм деформирования [20], модифицированный с учетом влияния вышеприведенных факторов. По результатам теоретических исследований получены зависимости проявлений масштабного эффекта квазипластичных пород, характеризующие изменения нормированных механических показателей от

размера образца и толщины деструктивного слоя. На рис. 8 приведен пример полученных зависимостей при толщине деструктивного слоя 1 и 2 мм. Для сопоставления даны экспериментальные результаты, полученные при сжатии образцов соляных пород различного размера.

Результаты проведенных исследований показывают, что изменение большинства механических показателей обусловлено наложением вышеприведенных влияющих факторов, усиливающих или ослабляющих проявления масштабного эффекта. Предлагаемый подход дает возможность экстраполировать значения механических показателей, полученных в лабораторных условиях, на шахтный уровень, что позволяет существенно повысить достоверность геомеханических оценок безопасных условий ведения горных работ в массивах квазипластичных пород.

Проведённые лабораторные исследования предназначены для разработки методик геомеханической оценки устойчивости грузонесущих элементов камерной системы разработки на калийных месторождениях.

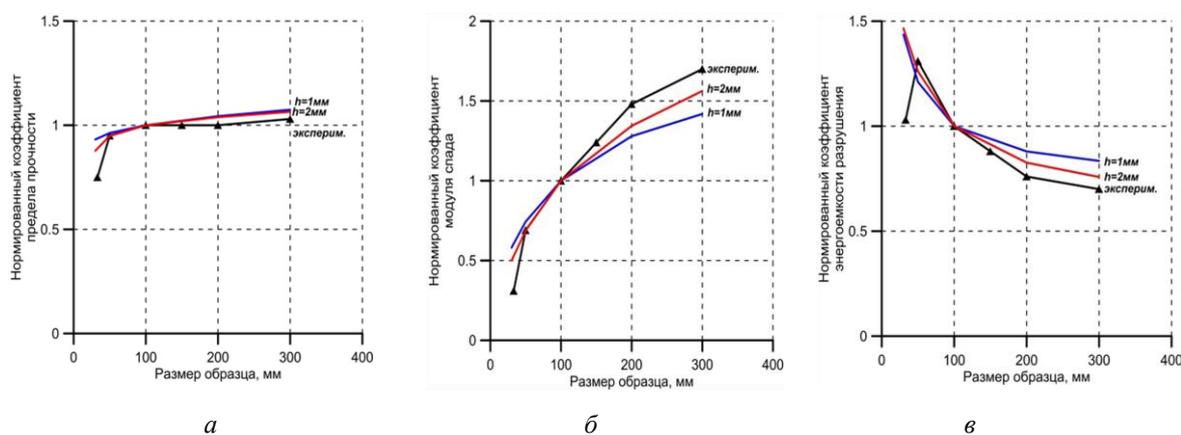


Рис. 8. Результаты экспериментальных и теоретических исследований проявлений поверхностного масштабного эффекта квазипластичных пород:  
 а – предел прочности; б – модуль спада; в – энергоёмкость разрушения

**Библиографический список**

1. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб.: Наука, 2001. – 343 с.
2. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Т. 1. / отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск: Изд-во СОРАН. – 2018. – 549 с.
3. Amadei B., Stephansson O. Rock stress and its measurement / Published by Chapman and Hall. – 1997. – 490 p.

4. In-situ Characterization of Rocks / Ed. K.R. Saxena, V.M. Sharma, A.A. Balkema Publishers. – 2002. – 358 p.
5. Введение в механику скальных пород: пер. с англ. / под ред. Х. Бока. – М.: Мир, 1983. – 276 с.
6. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
7. Барях А.А. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб.пособие / А.А. Барях, В.А. Асанов, И.Л. Паньков. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 199 с.
8. Тажобаев К.Т. Напряжения, процессы деформации и динамического разрушения горных пород: в 2 т. – Бишкек, Изд-во «Алтын Принт», 2016.
9. Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород: учеб.пособие для вузов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 222 с.
10. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташев, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1979. – 269 с.
11. Паньков И.Л., Асанов В.А., Ударцев А.А., Кузьминых В.С. Практика использования испытательного оборудования при изучении деформирования и разрушения квазипластичных горных пород в лабораторных условиях // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета, Кыргызская республика, – Бишкек, 2016. – № 1. – С. 163–167.
12. 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.
13. Varyakh A., Lobanov S., Lomakin I., Tsayukov A. Mathematical modelling of limit states for load bearing elements in room-and-pillar mining of saliferous rocks. EUROCK 2018: Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. 2018 Taylor & Francis Group, – London, ISBN: 978-1-138-61645-5, 1666p., pp.767–773.
14. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. – Пермь-Березники, 2014. – 130 с.
15. Tziallas G.P., Saroglou H., Tsiambaos G. Determination of mechanical properties offllysch using laboratory methods. Engineering Geology 2013;166:81–89.
16. Greco O.D., Ferrero A., Pella D. Behavior of laboratory specimens composed by different rocks. // In: 7<sup>th</sup> ISRM Congress. – 1991. – P. 241–245.
17. Ударцев А.А. Использование оптической системы Vic-3D для изучения полей деформаций при испытании образцов горных пород / Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. – Вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – С. 128–132. (DOI:10.7242/gdsp/2018.16.33).
18. Dreyer W. Neuere Untersuchungen auf dem Gebiet der Modellmechanik zur Erfassung der Standfestigkeit von Grubenbauen. Freiburger Forschungsh., 1967. – P. 51–68.
19. Zern E.N. Coal Miners' Pocketbook. N. Y., McGraw-Hill Book Co., 1928, 1273 p.
20. Паньков И.Л., Асанов В.А., Гурко И.В. Моделирование поведения горных пород под нагрузкой на основе энергетических представлений о накоплении повреждений./ Труды межд. конф. «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск: Изд-во Института горного дела СО РАН, 2004. – С. 55–60.

**STUDYING THE DEFORMATION AND FAILURE OF SALT ROCKS FOR  
GEOMECHANICAL ASSESSING THE STABILITY OF ELEMENTS OF THE SYSTEM FOR  
THE MINING AT POTASH DEPOSITS**

I.L. Pankov<sup>1</sup>, V.V. Anikin<sup>1</sup>, N.L. Beltyukov<sup>1</sup>, A.V. Evseev<sup>1</sup>, V.S. Kuzminykh<sup>2</sup>, I.S. Lomakin<sup>1</sup>,  
I.A. Morozov<sup>2</sup>, V.N. Toksarov<sup>1</sup>, A.A. Udartsev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mining Institute UB RAS

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University

**For citation:**

Pankov I.L., Anikin V.V., Beltyukov N.L., Evseev A.V., Kuzminykh V.S., Lomakin I.S., Morozov I.A., Toksarov V.N., Udartsev A.A. Studying the deformation and failure of salt rocks for geomechanical assessing the stability of elements of the system for the mining at potash deposits // Perm Federal Research Center Journal. – 2022. – № 3. – P. 14–24. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.3.2>

Complex studies aimed at developing methods for assessing the stability of inter-chamber pillars used in the conditions of the Verkhnekamskoe potash salt deposit has been carried out. Field measurements of massif deformations in the vicinity of the treatment chambers were done using contour and deep reference points. It has been established that the most informative indicator reflecting the geomechanical situation in the underground section of the potassium salt deposit is the lateral deformation of the pillars.

To assess the standard rates of deformation of inter-chamber pillars, laboratory research was conducted to study the deformation of salt samples under the action of a constant load in the step loading mode, as well as the determination of longitudinal and lateral deformations during compression of large scale samples.

As a part of the development of a method for calculating the equivalent strength of inter-chamber pillars, complex experimental studies were undertaken on layered cement-sand samples.

In order to reveal the influence of the length of inter-chamber pillars on their stability, experimental studies of the shape coefficient were held on rectangular sylvinitic samples of various lengths.

To take into account the influence of the time factor on the stability and deformability of the rocks in the roof of mine workings, the creep of salt rocks under uniaxial stepped tension was studied experimentally.

Within the framework of solving the problem of transferring the results of experimental determination of physical and mechanical properties of rocks to the full-scale level, theoretical and experimental studies were conducted to detect the scale effect in salt rocks under uniaxial compression.

*Keywords: potash deposit, chamber mining system, inter-chamber pillar, lateral deformation, strain rate, equivalent strength, shape factor, uniaxial tensile creep, scale factor.*

#### **Сведения об авторах**

*Паньков Иван Леонидович*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических процессов освоения георесурсов, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78 А; e-mail: ivpan@mi-perm.ru

*Аникин Владимир Васильевич*, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории физических процессов освоения георесурсов, «ГИ УрО РАН»; e-mail: Anikin@mi-perm.ru

*Бельтюков Николай Леонидович*, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории математического моделирования геотехнических процессов, «ГИ УрО РАН»; e-mail: bnl@mi-perm.ru

*Евсеев Антон Владимирович*, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории физических процессов освоения георесурсов, «ГИ УрО РАН»; e-mail: evseev@mi-perm.ru

*Кузьминых Виталий Сергеевич*, заведующий лабораторией кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: vskuzminyh@mail.ru

*Ломакин Иван Сергеевич*, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории механики горных пород, «ГИ УрО РАН»; e-mail: Lomakin@Mi-Perm.ru

*Морозов Иван Александрович*, старший преподаватель кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, ПНИПУ; e-mail: imorozov.work@yandex.ru

*Токсаров Валерий Николаевич*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических процессов освоения георесурсов, «ГИ УрО РАН»; e-mail: toksarov@mi-perm.ru

*Ударцев Артем Александрович*, младший научный сотрудник лаборатории математического моделирования геотехнических процессов, «ГИ УрО РАН»; e-mail: udartsev@mi-perm.ru

*Материал поступил в редакцию 30.03.2022 г.*