

На правах рукописи



Ударцев Артем Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ СОЛЯНЫХ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ
(НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)**

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2025

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН») и в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ).

Научный руководитель:

Паньков Иван Леонидович

кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник лаборатории физических
процессов освоения георесурсов.
«ГИ УрО РАН» (г. Пермь).

Официальные оппоненты:

Рыбин Вадим Вячеславович

доктор технических наук, доцент, главный научный
сотрудник, руководитель лаборатории геомониторинга и
устойчивости бортов карьеров Отдела геомеханики.
Горный институт - обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Федерального исследовательского центра «Кольский
научный центр Российской академии наук» (г. Апатиты).

Цой Павел Александрович

кандидат физико-математических наук,
заведующий Центром коллективного пользования
геомеханических, геофизических и геодинамических
измерений СО РАН.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского
отделения Российской академии наук (г. Новосибирск).

Ведущая организация:

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС» (г. Москва).**

Защита диссертации состоится «17» сентября 2025 года в __-__ часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ПФИЦ УрО РАН»: <http://www.permsc.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 года. Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах не позднее, чем за 10 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица, представившего его.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А, Ученый совет «ГИ УрО РАН». Телефон/факс: (342) 216-75-02.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук

С. Ю. Лобанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Разработка Верхнекамского месторождения существенно осложняется растворимостью солей, а также наличием водоносных горизонтов над соляной толщей. При нарушении сплошности водозащитной толщи появляется опасность проникновения подземных вод в горные выработки через трещины или другие нарушения, приводящая к размыванию соляных пород.

Одним из условий безопасной подработки водозащитной толщи является равномерный характер её деформирования. Это достигается за счет оставления междукammerных целиков, степень нагружения которых в соответствии с действующим нормативным документом («Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей») не должна превышать 0,4, в исключительных случаях – 0,5. В таких условиях целики должны сохранять свою устойчивость в течение длительного времени, обеспечивая сохранность водозащитной толщи и объектов, расположенных на земной поверхности. Вместе с тем, измерениями на земной поверхности и в очистных камерах выявлены участки, в пределах которых фактические скорости оседания значительно превышают ожидаемые (прогнозные) величины.

Наиболее вероятными причинами повышенных скоростей деформирования междукammerных целиков и оседания земной поверхности является несовершенство методик расчета параметров системы разработки, так как определение оптимальных размеров целика представляет собой сложную инженерную задачу, напрямую связанную с достоверностью оценки особенностей строения и механических свойств соляных пород на отрабатываемых участках.

Таким образом, совершенствование методов расчета несущей способности междукammerных целиков и степени их нагружения, направленное на учет экспериментальных закономерностей изменения прочностных и деформационных показателей под влиянием различных факторов, имеет важное значение для теории и практики безопасного освоения водорастворимых руд.

Целью работы является включение в расчет несущей способности соляных междукammerных целиков ряда факторов, определяющих параметры камерной системы разработки.

Идея работы заключается в учете влияния длины, слоистости и реологических свойств пород при оценке несущей способности соляных междукammerных целиков на основе установленных экспериментальных зависимостей.

Основные задачи работы:

- провести комплекс лабораторных исследований на прямоугольных образцах сильвинита различной длины и высоты для оценки влияния формы междукammerных целиков на их деформирование и разрушение;

- построить зависимости влияния формы сильвинитовых образцов на следующие механические показатели: предел прочности, разрушающая деформация, касательный модуль деформации, модуль упругости, модуль спада, а также удельная энергоемкость разрушения;

- провести исследования влияния слабого слоя на прочность слоистых образцов при сжатии для оценки влияния слоистого строения междукамерных целиков на их степень нагружения;

- обосновать расчетную зависимость определения эквивалентной прочности слоистых соляных целиков, адекватно отражающую изменение их несущей способности при значительной вариации прочностных характеристик и толщин слагающих слоев;

- провести комплекс лабораторных исследований при условно-мгновенном и длительном нагружении сильвинитовых образцов в условиях одноосного и объемного сжатия;

- разработать методику ускоренного определения предела длительной прочности соляных пород при кратковременной одноосной и объемной ползучести;

- дать оценку влияния формы соляных междукамерных целиков на предел их длительной прочности;

- разработать усовершенствованную методику расчета несущей способности соляных междукамерных целиков с учетом их длины, слоистости и реологических свойств пород.

Методы исследования предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали: анализ и обобщение научного и практического опыта по поставленной проблеме, лабораторные испытания при различных режимах нагружения, физическое моделирование деформирования и разрушения несущих элементов камерной системы разработки, статистический и корреляционный анализ экспериментальных данных.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальная зависимость изменения несущей способности соляных междукамерных целиков от длины, полученная по результатам лабораторных испытаний, позволяющая повысить точность расчета степени их нагружения.

2. Формула расчета эквивалентной прочности многослойных целиков горных пород, учитывающая влияние прочности наиболее слабого слоя, полученная по результатам представительных испытаний слоистых образцов, которая позволяет повысить точность расчета степени нагружения грузонесущих элементов камерной системы разработки.

3. Метод определения коэффициента длительной прочности образцов соляных пород, учитывающий скорость установившейся ползучести и величину критической деформации на пределе остаточной прочности, используемый для корректировки расчета допустимой степени нагружения междукамерных целиков различной формы.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

обеспечивается представительным объемом экспериментальных лабораторных исследований (испытано более 1,5 тысяч образцов), выполненных с использованием апробированных методик и сертифицированного оборудования, их качественной сходимостью с данными других авторов, соответствием полученных результатов современным представлениям о закономерностях деформирования несущих элементов камерной системы разработки соляных пород.

Научная новизна работы:

- построены новые экспериментальные зависимости, отражающие влияние относительной длины образца на прочностные и деформационные характеристики сильвинитовых пород и позволяющие получать предельные значения физико-механических показателей при сжатии «бесконечно» длинного целика;

- построены экспериментальные зависимости влияния толщины слабого слоя на прочность составных образцов, изготовленных методом «сплошной заливки»;

- предложена новая эмпирическая зависимость для расчета эквивалентной прочности междукammerных целиков, работающих в условиях «нормальной» и «повышенной» глинизации;

- предложена новая методика ускоренного построения расчетной кривой длительной прочности для соляных пород, базирующаяся на условно-мгновенных и длительных испытаниях;

- на основе анализа результатов экспериментов на ползучесть получено новое эмпирическое уравнение кривой длительной прочности, включающее в свое выражение коэффициент длительной прочности;

- получена зависимость изменения коэффициента формы для предела длительной прочности от отношения ширина целика к его высоте.

Практическая значимость работы заключается:

- в получении экспериментальных зависимостей влияния формы соляных целиков на характер их деформирования;

- в разработке новой эмпирической зависимости расчета эквивалентной прочности междукammerных целиков;

- в разработке методики определения предела длительной прочности соляных пород при одноосном и объемном сжатии;

- в обосновании зависимости величины коэффициента формы для предела длительной прочности от отношения ширины целика к его высоте, которая может быть использована для корректировки допустимой степени нагружения;

- в уточнении методики расчета несущей способности соляных междукammerных целиков;

- в разработке алгоритма расчета ширины соляных междукammerных целиков.

Реализация работы. Результаты экспериментальных исследований и методика геомеханических расчетов использованы при решении практических

задач по оценке безопасных условий разработки на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей.

Связь работы с крупными научными программами и темами.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с грантами РФФИ «Разработка методов геомеханической оценки устойчивости грузонесущих элементов камерной системы разработки калийных месторождений на основе комплекса теоретических, лабораторных и натурных исследований деформирования и разрушения соляных пород» (№ 19-45-590004 р_а); «Разработка научных основ комплексной оценки напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при освоении соляных и калийных месторождений» (№ 20-45-596011 р_НОЦ_Пермский край); грантом Правительства Российской Федерации (Постановление № 220 от 9 апреля 2010 г.) договор № 14.B25.31.0006 от 24 июня 2013 года; в рамках программы ФНИ государственных академий наук на 2021-2023 годы: «Комплексное освоение и сохранение недр Земли, инновационные процессы разработки месторождений полезных ископаемых и глубокой переработки минерального сырья», тема «Исследование характера деформирования и разрушения квазипластичных горных пород в сложных условиях нагружения», а также с хоздоговорными темами с ПАО «Уралкалий», ООО «ЕвроХим – УКК» и ООО «Еврохим-Волгакалий». Также диссертационная работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024 г.).

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития Верхнекамья» (Пермь-Березники, 2013 г.); на II Международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика: проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования» (Пермь, 2015 г.); на XXVIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2020» (Москва, 2020 г.); на XXII Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 2021 г.); на III Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения безопасности добычи и использования калийно-магниевых солей» (Пермь, 2022 г.); на Научной сессии ГИ УрО РАН «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, 2015, 2023 г.); на V Международной научно-практической конференции на тему «Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей» (Пермь, 2024 г.); на XIX Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2025 г.).

Личный вклад автора. При непосредственном участии автора проведена постановка задач исследования и подготовка образцов к испытаниям, выполнен комплекс экспериментов в лабораторных условиях с последующей обработкой и анализом полученных результатов, проведена разработка научных решений и

их практическая реализация, сформулированы основные научные положения и выводы.

Автор выражает свою искреннюю благодарность сотрудникам лаборатории физических процессов освоения георесурсов «ГИ УрО РАН» и сотрудникам кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Пермского национального исследовательского политехнического университета за участие в обсуждении полученных результатов и помощь при оформлении диссертации.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 работ, в том числе 5 из списка изданий, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и 6 в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 212 страницах машинописного текста, включая 64 рисунка, 12 таблиц, 7 Приложений и список использованной литературы из 208 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведена краткая характеристика горно-геологических и горнотехнических условий разработки Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС), проведен анализ состояния конструктивных элементов камерной системы разработки, рассмотрены основные факторы, влияющие на несущую способность соляных междукammerных целиков (МКЦ), сформулированы цели и задачи исследований.

Анализ фактических ситуаций на рудниках ВКМКС указывает на то, что на некоторых участках месторождения с более сложными горно-геологическими условиями требуется уточнение параметров, оценивающих влияние различных факторов на несущую способность целиков. К основным факторам, влияющим на расчет грузонесущих элементов камерной системы разработки, можно отнести форму целиков, как в продольном, так и поперечном направлении, неоднородность строения, наличие глины и реологические свойства горных пород, слагающих МКЦ.

Влияние формы образцов (целиков) на их прочность при сжатии исследовалось многими авторами, такими как Шевяков Л.Д., Кузнецов Г.Н., Меликидзе И.Г., Ильницкая Е.И., Кунтыш М.Ф., Проскуряков Н.М., Карташов Ю.М., Шашенко А.Н., Бенявски З., Бурштейн Л.С., Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л., Dreyer W., Stamatiu M., Zern E.N. и др. Несмотря на значительное количество проведенных исследований, 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. Анализ литературных источников показал, что вопрос влияния длины на несущую способность целиков изучен крайне мало. Здесь можно отметить работы Нестеренко Г.Т., Панькова И.Л., Wagner H., Maritz J.A.,

Babcock C., Mark C., Salamon M.D.G., Dolinar D.R. В силу отсутствия исследований влияния длины (l) соляных образцов (целиков) на их несущую способность, необходимо провести комплекс экспериментальных исследований в данной области.

Значительное количество исследований было посвящено изучению влияния глинистых пластичных прослоек на прочностные свойства горных пород, выполненных такими учеными, как Проскуряков Н.М., Трумбаев В.Ф., Мельников Е.А., Бублик Ф.П., Полянина Г.Д., Жихарев С.Я., Иванов Г.А., Барях А.А., Асанов В.А., Ломакин И.С. Все проведенные исследования показывают, что на несущую способность междукамерных целиков влияет наличие «слабых» пластичных прослоек, при этом важно учитывать их мощность, влажность, местоположение и ряд других факторов.

Вопрос, связанный с влиянием слоистости на устойчивость целиков, изучался в трудах Кузнецова Г.Н., Бублика Ф.П., Раденко Е.С., Безкаравайного В.Г., Кима Д.Н., Ржевского В.В., Tziallas G.P., Liang W., Greco O.D., Mohamed Z., Vergara M.R., Rupar V. и других авторов. Эксперименты на сжатие проводились на композитных образцах горных пород, а также образцах, изготовленных из эквивалентных материалов. Для соляных пород ВКМКС учет влияния слоистости ведется с помощью простейшего уравнения гармонического средневзвешенного, использование которого требует явного обоснования с помощью проведения сопоставительных исследований.

Изучением реологических свойств горных пород, а также оценкой предела их длительной прочности занимались Карташов Ю.М., Проскуряков Н.М., Ильницкая Е.И., Гальперин А.М., Габдрахимов И.Х., Водопьянов В.Л., Ставрогин А.Н., Вялов С.С., Тавостин М.Н., Асанов В.А., Титов Б.В., Литвинский Г.Г., Рыженьков А.М., Агеев В.А., Оксенкруг Е.С., Паньков И.Л., Ержанов Ж.С., Осипов Ю.В., Вознесенский А.С., Singh D.P., Desayi P., Wang J., Lyu C., Wu C., Singh A., Mansouri H., Günther R., Rahimi S., Ladanyi B., Brandao N. B., Knoll P., Dreyer W. и многие другие исследователи. В связи с тем, что прямой метод определения предела длительной прочности горных пород является достаточно трудоемким и требует значительных затрат времени, на практике зачастую используют укоренные или косвенные методы определения реологических параметров. Сравнительный анализ которых показал, что большинство ускоренных методов не обладают универсальностью и могут использоваться только для определенного класса горных пород. Многие из них требуют четкого обоснования и сопоставительного контроля с прямыми исследованиями. Поэтому выбор метода, наиболее представительного для соляных пород, является весьма затруднительным.

Результаты исследований предела длительной прочности соляных пород выявили, что данный реологический параметр не является постоянной характеристикой породы, его величина зависит от ряда факторов. При этом вопрос, связанный с влиянием коэффициента формы на длительную прочность породы, остается спорным.

В этой связи актуальной является задача разработки относительно точного метода определения предела длительной прочности соляных пород и получение достоверных результатов при различных напряженных состояниях, а также оценка влияния коэффициента формы на исследуемый показатель.

Вторая глава посвящена изучению влияния длины соляных МКЦ на их деформирование и разрушение при одноосном сжатии. Исследования проводились в лабораторных условиях на прямоугольных образцах сильвинита различной длины (l) и высоты (h). Размеры образцов составляли: ширина (a) – 35 мм, высота (h) – 26; 35; 44; 70 мм, длина (l) – 35, 70, 140 и 210 мм. Изготовление образцов осуществлялось из породных монолитов (блоков) красного, полосчатого и пестрого сильвинита. Общее количество отобранных блоков составило 7 шт., общее количество испытанных образцов – 220 шт.

По результатам эксперимента строились полные диаграммы деформирования в координатах «нагрузка – продольная деформация», по которым определялся полный комплекс прочностных и деформационных показателей. Пример диаграмм деформирования для сильвинитовых образцов с высотой 26, 35 и 70 мм представлен на рис. 1.

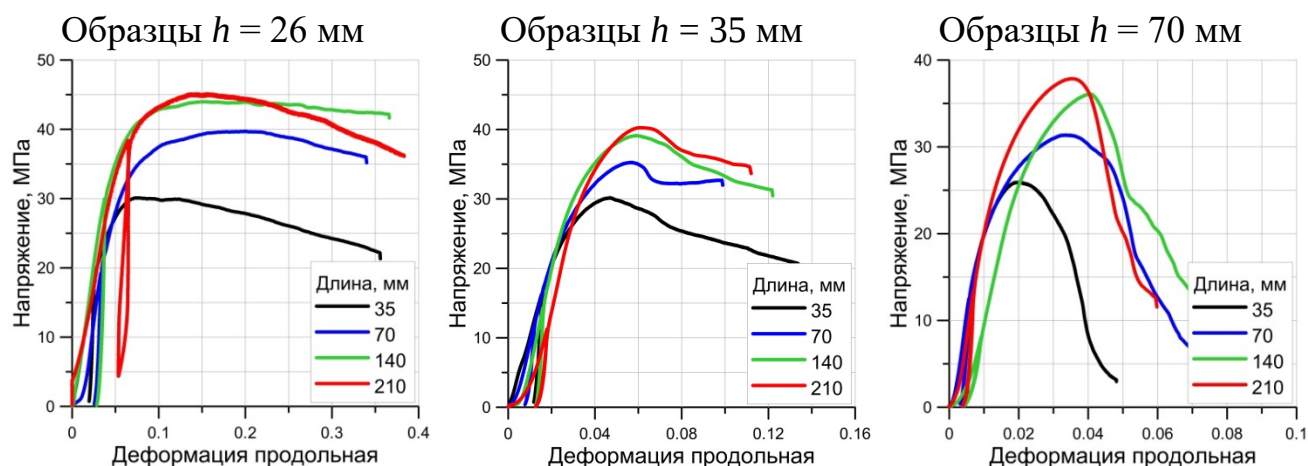


Рис. 1. Пример диаграмм деформирования образцов сильвинита

Анализ результатов испытаний показал, что с увеличением длины образца происходит увеличение предела прочности, разрушающей деформации и удельной энергоемкости разрушения для всех серий испытаний, при этом интенсивность роста данных показателей снижается с увеличением длины образца. Модуль деформации (секущий) с увеличением длины образцов практически не изменяется, а касательный модуль деформации имеет тенденцию к снижению при увеличении длины образцов, аналогичная картина наблюдается для модуля упругости и модуля спада.

В целях сопоставления всех результатов, полученных из разных блоков, а также разработки нового коэффициента, учитывающего фактор протяженности поддерживающих междукламерных целиков, проводилось нормирование предела прочности по следующей формуле:

$$K_l^{\sigma_{\text{пр}}} = \frac{\sigma_{\text{пр}}(a, l, h)}{\sigma_{\text{пр}}(a = l = 0,5h)}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{пр}}(a, l, h)$ – значение предела прочности, соответствующее образцам с различной длиной (l) и высотой (h); $\sigma_{\text{пр}}(a = l = 0,5h)$ – значение предела прочности, соответствующее образцам с размерами $a = 35$ мм, $l = 35$ мм и $h = 70$ мм. Полученные зависимости влияния относительной длины образца (l/a) на осредненный коэффициент протяженности иллюстрируются на рис. 2.

Для описания экспериментальных данных необходимо учитывать, что при «бесконечном» длинном целике коэффициент протяженности должен выходить на какое-то постоянное значение. В этой связи предложено аппроксимировать представленные зависимости следующим выражением:

$$K_l^{\sigma_{\text{пр}}} = A \cdot \frac{l/a}{B + l/a}, \quad (2)$$

где A и B – параметры аппроксимации, при этом параметр A соответствует значению коэффициента протяженности при длине целика стремящейся к бесконечности. Определение параметров аппроксимации A и B проводилось с помощью преобразования Лайнвивера-Берка.

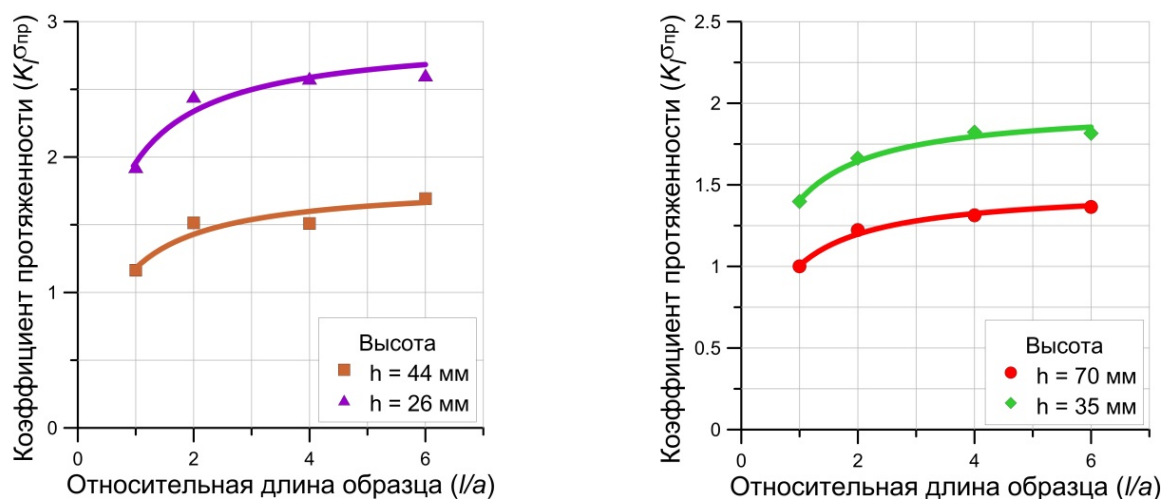


Рис. 2. Характер изменения коэффициента протяженности в зависимости от длины прямоугольных образцов силвинита

По аналогии с прочностным коэффициентом протяженности вводились понятия коэффициентов протяженности для разрушающей деформации на пределе прочности ($K_l^{\varepsilon_{\text{пр}}}$), касательного модуля деформации ($K_l^{D_y}$), модуля упругости (K_l^E), модуля спада ($K_l^{M_c}$) и удельной энергоемкости разрушения ($K_l^{W_v}$).

Результаты анализа изменения новых коэффициентов протяженности от относительной длины образца показали, что интенсивность роста коэффициента протяженности для разрушающей деформации уменьшается с увеличением длины образца, и в исследуемом диапазоне данная зависимость хорошо аппроксимируется выражением (2) для всех серий испытаний. Аналогичная картина наблюдается с коэффициентом протяженности для удельной энергоемкости разрушения.

Для модулей деформации, упругости и спада исследования выявили снижение коэффициентов протяженности рассматриваемых параметров с увеличением относительной длины образцов и предположительным выходом на асимптоту при «бесконечно» длинном образце (целике). Наибольшее влияние увеличения длины сильвинитовых образцов сказывается на модуле упругости, снижение которого происходит более круто. Все полученные зависимости были аппроксимированы функцией следующего вида:

$$K_l = A \cdot \frac{B + l/a}{l/a}. \quad (3)$$

Все функциональные зависимости коэффициента протяженности для прочностных, деформационных и энергоемкостных параметров от соотношения размеров образцов, построенные по результатам статистической обработки экспериментальных исследований, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты протяженности для механических и энергоемкостных показателей сильвинитовых образцов

Определяемый коэффициент	Обозначение	h , мм	R^2	Уравнение
Предел прочности	$K_l^{\sigma_{np}}$	70	0,99	$K_l^{\sigma_{np}} = 1,48 \cdot (l/a)/(0,47 + l/a)$
		44	0,89	$K_l^{\sigma_{np}} = 1,81 \cdot (l/a)/(0,54 + l/a)$
		35	0,98	$K_l^{\sigma_{np}} = 1,98 \cdot (l/a)/(0,41 + l/a)$
		26	0,94	$K_l^{\sigma_{np}} = 2,90 \cdot (l/a)/(0,48 + l/a)$
Разрушающая деформация	$K_l^{\epsilon_{np}}$	70	0,99	$K_l^{\epsilon_{np}} = 1,59 \cdot (l/a)/(0,58 + l/a)$
		44	0,96	$K_l^{\epsilon_{np}} = 3,08 \cdot (l/a)/(1,04 + l/a)$
		35	1,00	$K_l^{\epsilon_{np}} = 2,55 \cdot (l/a)/(0,45 + l/a)$
		26	0,95	$K_l^{\epsilon_{np}} = 9,22 \cdot (l/a)/(0,81 + l/a)$
Касательный модуль деформации	$K_l^{D_y}$	70	0,67	$K_l^{D_y} = 0,63 \cdot (0,68 + l/a)/(l/a)$
		44	0,90	$K_l^{D_y} = 0,35 \cdot (1,16 + l/a)/(l/a)$
		35	0,62	$K_l^{D_y} = 0,49 \cdot (0,48 + l/a)/(l/a)$
		26	0,91	$K_l^{D_y} = 0,36 \cdot (0,29 + l/a)/(l/a)$
Модуль упругости	K_l^E	70	0,82	$K_l^E = 0,47 \cdot (1,22 + l/a)/(l/a)$
		44	0,89	$K_l^E = 0,40 \cdot (1,21 + l/a)/(l/a)$
		35	0,67	$K_l^E = 0,46 \cdot (0,81 + l/a)/(l/a)$
		26	0,99	$K_l^E = 0,37 \cdot (0,89 + l/a)/(l/a)$
Модуль спада	$K_l^{M_c}$	70	0,45	$K_l^{M_c} = 0,80 \cdot (0,31 + l/a)/(l/a)$
		44	0,99	$K_l^{M_c} = 0,22 \cdot (1,00 + l/a)/(l/a)$
		35	0,98	$K_l^{M_c} = 0,09 \cdot (2,58 + l/a)/(l/a)$
		26	0,99	$K_l^{M_c} = 0,04 \cdot (2,00 + l/a)/(l/a)$
Удельная энергоемкость разрушения	$K_l^{W_v}$	70	0,88	$K_l^{W_v} = 2,20 \cdot (l/a)/(1,14 + l/a)$
		44	0,90	$K_l^{W_v} = 11,51 \cdot (l/a)/(3,81 + l/a)$
		35	0,74	$K_l^{W_v} = 5,65 \cdot (l/a)/(0,71 + l/a)$
		26	0,99	$K_l^{W_v} = 33,44 \cdot (l/a)/(1,12 + l/a)$

Полученные соотношения коэффициентов протяженности для предела прочности имеют важное прикладное значение в геомеханических расчетах целиков различной длины, так как по своей сути являются аналогом коэффициента k_l , учитывающего влияние прорезки ленточных МКЦ при оценке их агрегатной прочности на ВКМКС.

Для разработки общего коэффициента протяженности, учитывающего все полученные результаты, проводилось нормирование предела прочности для каждой партии силвинитовых образцов с одинаковой высотой (h). Осреднение данных для каждой длины проводилось по формуле арифметического средневзвешенного. Зависимость изменения осредненного коэффициента протяженности от относительной длины образца хорошо описывается следующим выражением:

$$K_l^{\sigma_{\text{пр}}} = 1,48 \cdot (l/a)/(0,47 + l/a). \quad (4)$$

С целью практического применения полученного уравнения (4) и в качестве сопоставления результатов проведен расчет степени нагружения ленточных междукammerных целиков с учетом коэффициента протяженности и коэффициента прорезки на примере рудника БКПРУ-4 ВКМКС. Установлено, что расчет по новым рекомендациям снижает данный показатель в среднем на 16,6 % по сравнению с нормативным документом.

Таким образом, предлагаемая схема учета влияния длины междукammerных целиков на их несущую способность позволяет уточнить оценку степени их нагружения.

В третьей главе представлены результаты оценки несущей способности междукammerных целиков на основе испытаний слоистых цементных образцов, изготовленных из песчано-цементной смеси, в условиях одноосного сжатия. Изготовление слоистых цементных образцов осуществлялось по специально разработанной методике «сплошной заливки», позволяющей с помощью подбора соотношений компонентов (песок + цемент) получать образцы заданной прочности с отношением высоты к ширине равным двум. По данной методике изготавливались неоднородные блоки с двухслойными, трехслойными и четырёхслойными слоистыми образцами. Каждая партия включала в себя образцы, состоящие из прочных и слабых слоев, а также однородных образцов, используемых для определения прочностных показателей соответствующих слоев. Общее количество залитых блоков составило 19 шт., изготовленных образцов – 852 шт.

По результатам эксперимента на одноосное сжатие строились полные диаграммы деформирования, по которым определялись прочностные и деформационные показатели составных образцов. Пример семейства диаграмм деформирования, полученных при испытании составных образцов с различной высотой слабого слоя, для двухслойных, трехслойных и четырёхслойных блоков представлен на рис. 3. Также, кроме экспериментальных данных, проводился расчет прочности слоистых образцов по формуле гармонического средневзвешенного ($\sigma_{\text{гарм}}$), которая используется при определении эквивалентной прочности неоднородных целиков на ВКМКС.

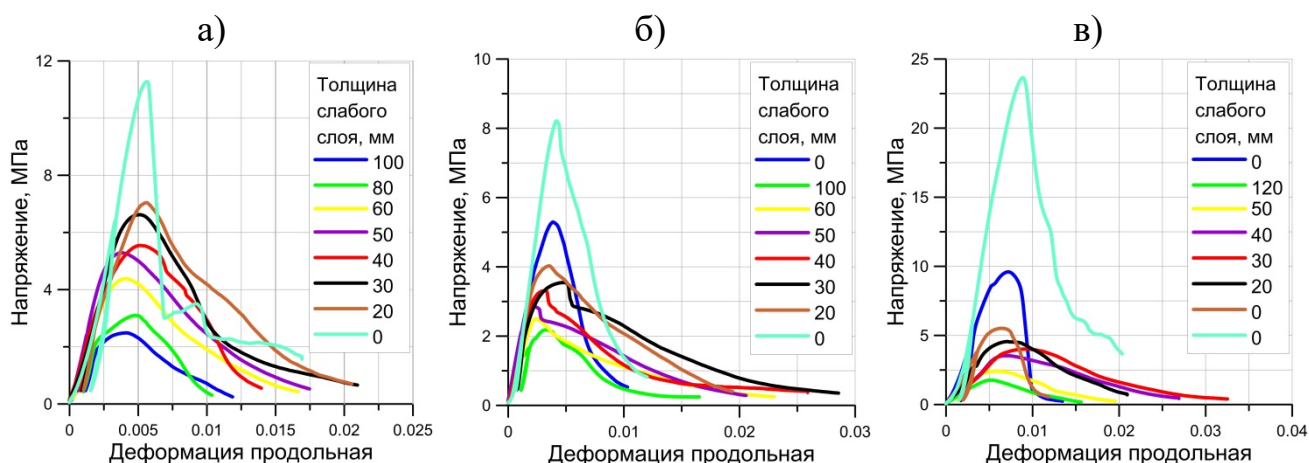


Рис. 3. Пример семейства диаграмм деформирования для двухслойного (а), трехслойного (б) и четырехслойного (в) блока

При анализе полученных результатов наблюдается тенденция уменьшения прочности и разрушающей деформации цементно-песчаных слоистых образцов с увеличением толщины слабого слоя для всех блоков. Для двухслойных блоков наиболее резкое снижение прочности происходит на образцах с толщиной слабого слоя 20 мм. Аналогичная ситуация наблюдается для трехслойных и четырехслойных блоков, где максимально интенсивное снижение предела прочности происходит на образцах с толщиной слабого слоя 20 – 30 мм.

По осредненным результатам экспериментальных ($\sigma_{\text{пр}}$) и расчетных ($\sigma_{\text{гарм}}$) данных были построены зависимости влияния толщины слабого слоя на прочность составных образцов. Сопоставительный анализ результатов показал, что для большинства партий образцов экспериментальные значения предела прочности существенно отличаются от расчетных значений, полученных по формуле гармонического средневзвешенного. Кривая экспериментальных значений расположена значительно ниже расчетных величин, среднее отклонение достигало 30 – 38 %.

С целью более полного изучения характера деформирования и механизма разрушения слоистых образцов, часть испытаний на одноосное сжатие проводилась с применением бесконтактной трехмерной оптической системы Vic-3D фирмы «Correlated Solutions», которая позволяет строить поля продольных и поперечных деформаций по всей поверхности образца, методом корреляции цифровых изображений. Интерпретация результатов, полученных при испытании двухслойных, трехслойных и четырехслойных образцов, показала явную неоднородность и локализацию полей продольных и поперечных деформаций. Интенсивность деформаций, начало трещинообразования и эволюция трещин приходятся на более слабый участок образца. Проведенные исследования доказывают, что на устойчивость соляных МКЦ наибольшее влияние оказывает слой с наименьшей прочностью.

В целом анализ полученных результатов показал, что расчет эквивалентной прочности по формуле гармонического средневзвешенного дает значительные погрешности, в этой связи необходимым является построение

новой расчетной зависимости, адекватно отражающей изменение прочности слоистых образцов (целиков) при вариации прочностных характеристик и толщин слагающих слоев.

С целью разработки нового эмпирического соотношения расчета эквивалентной прочности междукамерных целиков проводилось осреднение данных, полученных при испытании слоистых образцов. Оценка результатов проводилась по всем блокам, сгруппированным по количеству слоев: 1 группа – двухслойные, 2 группа – трехслойные, 3 группа – четырехслойные. Для более точного описания полученных приведенных данных предложено новое расчетное соотношение, представленное следующим уравнением:

$$H \cdot (\sigma_0 - \sigma_{\min})^k = \sum_i^n H_i \cdot (\sigma_{ci} - \sigma_{\min})^k, \quad (5)$$

где H – высота слоистого образца (междукамерного целика); H_i – толщина (мощность) i -го слоя ($i = 1, 2 \dots n$); n – количество разнопрочных слоев в образце (целике), σ_{ci} – расчетная прочность при сжатии стандартных образцов (с отношением высоты к ширине равном двум) i -го слоя; $\sigma_{\min}$ – минимальная расчетная прочность при сжатии стандартных образцов i -го слоя; k – эмпирический коэффициент.

На рис. 4 представлены осредненные зависимости влияния толщины слабого слоя на прочность слоистых образцов для двухслойных, трехслойных и четырехслойных блоков (кривая 1), описанные новым эмпирическим соотношением (кривая 3) и для сравнения формулой гармонического средневзвешенного (кривая 2).

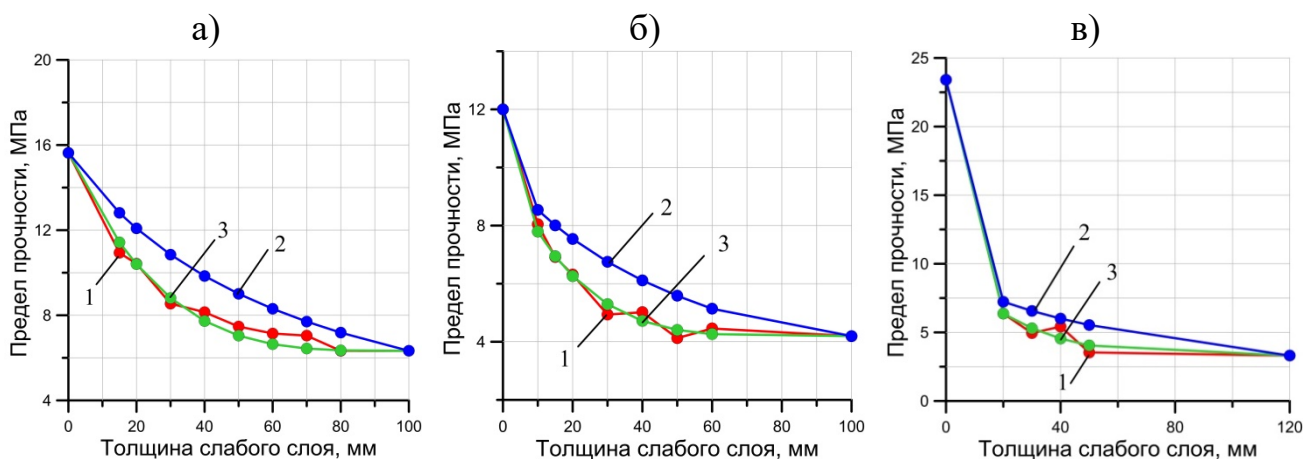


Рис. 4. Графики изменения прочности двухслойных (а), трехслойных (б) и четырехслойных (в) образцов от толщины слабого слоя: 1 – осредненные экспериментальные данные; 2 – расчетные данные по формуле среднего гармонического; 3 – расчетные данные по новому уравнению (5)

Анализ построенных зависимостей показал, что новое расчётное соотношение (5), где в качестве показателя защита минимальная прочность слоя, описывает экспериментальные значения наиболее корректно, средняя дисперсия (MS) для двухслойных, трехслойных и четырехслойных блоков стремится к нулю и составляет 0,064, 0,022 и 0,095 МПа², разброс

эмпирического коэффициента k между группами минимальный и в среднем составляет 0,24.

Для оценки эффективной работы нового эмпирического соотношения был проведен расчет агрегатной прочности пород и степени нагружения МКЦ для участков ВКМКС с «повышенным» и «нормальным» содержанием глины по методике, изложенной в нормативном документе и с учетом формулы (5), где в качестве минимальной расчетной прочности при сжатии i -го слоя ($\sigma_{\min}$) использовалась прочность глины.

Результат сравнительного анализа показал, что для участков с «нормальным» содержанием глины расчет несущей способности МКЦ по нормативной и предлагаемой методике практически не отличается, разница составляет менее 1 %. Для целиков с «повышенным» содержанием глины несущая способность, рассчитанная по предлагаемой методике, значительно ниже значений, рассчитанных по нормативному документу, различие составляет от 13 до 20 %. Таким образом, можно объяснить повышенные скорости деформирования МКЦ на данных участках, ведь фактическая степень нагружения превышает расчётные величины на 13 – 20 %.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что новое соотношение (5) дает более адекватную оценку и может применяться на практике при расчете несущей способности соляных МКЦ.

В четвертой главе представлены результаты определения предела длительной прочности соляных пород прямым и ускоренным методом в условиях одноосного и объемного сжатия. Изучение реологических свойств горных пород проводилось на сильвинитовых образцах призматической формы, изготовленных из породных монолитов или керны геологоразведочных скважин, с отношением высоты (h) к ширине (b) равным – 1,0; 1,5; 2,0. Общее количество изготовленных образцов на реологию составило 280 шт.

Перед проведением испытаний на ползучесть, для установления базовых уровней нагружения, определялся условно-мгновенный предел прочности при одноосном и объемном сжатии, по 3-9 образцов для каждой серии. Общее количество испытанных образцов при условно-мгновенном нагружении составило 121 шт. По результатам испытаний строились полные диаграммы деформирования в координатах «нагрузка – продольная деформация», которые использовались для определения мгновенного предела прочности и соответствующих деформационных параметров. Пример полученных диаграмм деформирования для одноосных и объёмных испытаний представлен на рис. 5.

Качественный анализ результатов условно-мгновенных испытаний показал, что с увеличением бокового давления значения основных механических показателей: предел прочности, разрушающая деформация и деформация на остаточном пределе прочности – увеличиваются, а значения модулей деформации, модуля спада и модуля упругости напротив – уменьшаются. Аналогичная ситуация наблюдается и с уменьшением высоты образца, где прочность и деформации – увеличиваются, а модули – уменьшаются.

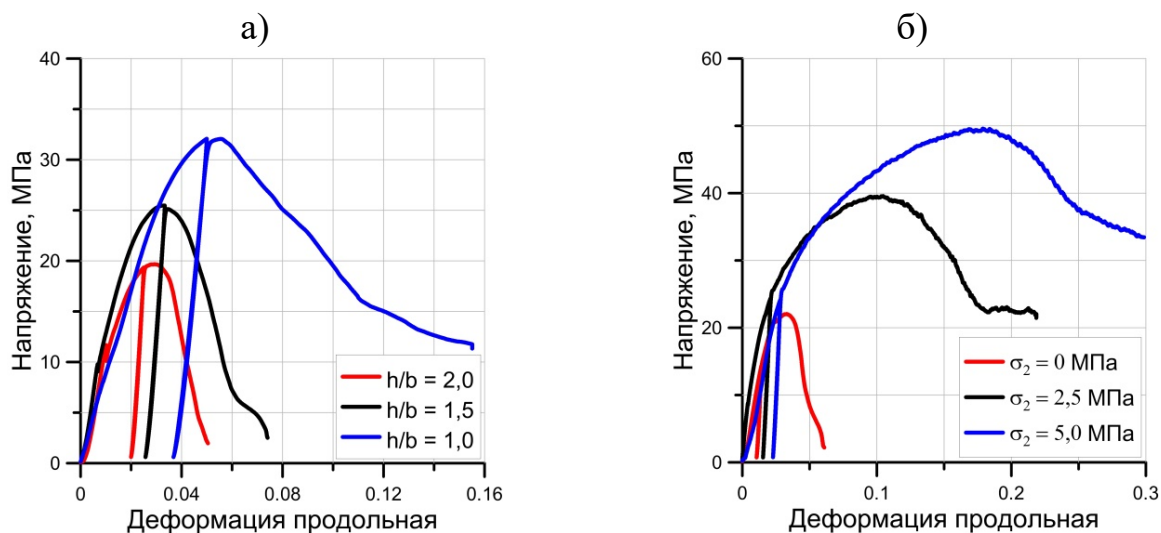


Рис. 5. Пример диаграмм деформирования образцов сильвинита при одноосном (а) и объемном (б) нагружении

Проведение длительных испытаний прямым методом на одноосную и объемную ползучесть для всех серий образцов осуществлялось при разных уровнях нагрузки, в зависимости от среднего предела прочности на сжатие, полученного по результатам мгновенных испытаний. Испытания на одноосную ползучесть проводились на образцах с различным соотношением высоты к ширине ($h/b = 1,0; 1,5; 2,0$). Объемные испытания проводились на образцах с $h/b = 2,0$ и заключались в проведении серии лабораторных экспериментов по схеме Кармана с различными уровнями бокового давления ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0; 2,5; 5,0$ и $7,5$ МПа).

По результатам наблюдений изменения деформаций во времени строились кривые ползучести для разных уровней нагружения в координатах «время – продольная деформация» с последующим анализом скоростей деформирования образцов. Оценка проводилась на стадии установившейся ползучести, характеризующейся постоянной скоростью. Пример характерных кривых ползучести сильвинита для разных уровней нагружения при одноосном и объемном сжатии представлен на рис. 6.

В целом результаты проведенных исследований позволили констатировать, что с увеличением отношения высоты к ширине (h/b) уменьшается деформируемость образцов сильвинита во времени. Данный вывод согласуется с результатами мгновенных испытаний, при которых наибольшие относительные деформации наблюдаются у низких образцов соляных пород. Также установлено, что с уменьшением высоты образцов повышается интенсивность деформирования сильвинита на стадиях неустановившейся и установившейся ползучести, аналогичная картина наблюдается с увеличением бокового давления.

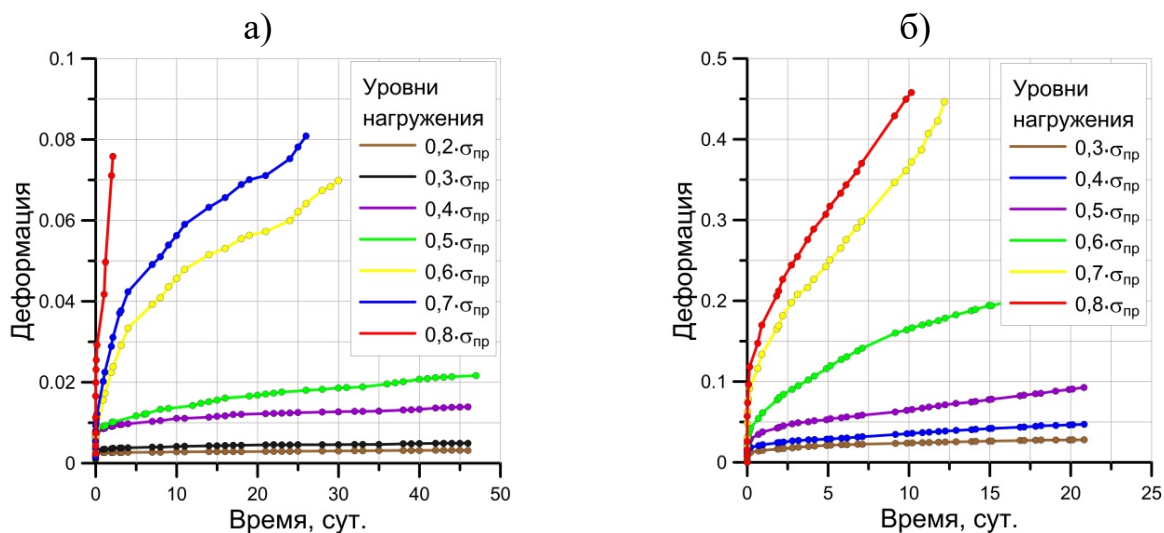


Рис. 6. Характерные семейства кривых ползучести сильвинитовых образцов:
а – одноосное сжатие ($h/b = 2,0$); б – объемное сжатие ($\sigma_2 = \sigma_3 = 5,0$ МПа)

По средним результатам оценки времени разрушения сильвинитовых образцов строились кривые длительной прочности, анализ которых позволил установить оценочные значения коэффициентов длительной прочности. Для большинства партий сильвинита определяемый параметр находился в пределах от 0,35 до 0,45. Как было отмечено выше, недостатками прямого метода являются трудоемкость и длительность проведения экспериментов, к тому же необходимо отметить о приблизительном характере определяемых величин, так как невозможно указать конкретную величину коэффициента длительной прочности, а лишь диапазон его вероятных значений.

В целях разработки нового метода определения коэффициента длительной прочности, проведен анализ скорости установившейся ползучести при различных уровнях нагрузки. Установлено, что по скорости можно определять время разрушения и объективно оценивать уровень действующего нагружения для каждого в отдельности образца. Характер изменения скоростей относительных деформаций в зависимости от уровня нагружения при одноосном и объемном сжатии показан на рис. 7.

Полученные зависимости удовлетворительно аппроксимируются степенной функцией вида:

$$\dot{\varepsilon} = A \cdot \left(\frac{K}{1-K}\right)^n \quad (6)$$

где $K = \sigma/\sigma_{\text{пр}}$ – уровень нагрузки; σ – действующее напряжение на образец, МПа; $\sigma_{\text{пр}}$ – разрушающая нагрузка при сжатии, МПа; A и n – параметры аппроксимации. Корректировка уровня действующего нагружения для каждого сильвинитового образца проводилась путем преобразования выражения (6) к следующему виду:

$$K = \frac{n\sqrt[n]{\frac{\dot{\varepsilon}_0}{A}}}{\left(1 + n\sqrt[n]{\frac{\dot{\varepsilon}_0}{A}}\right)}, \quad (7)$$

где $\dot{\epsilon}_0$ – скорость установившейся ползучести отдельно взятого образца.

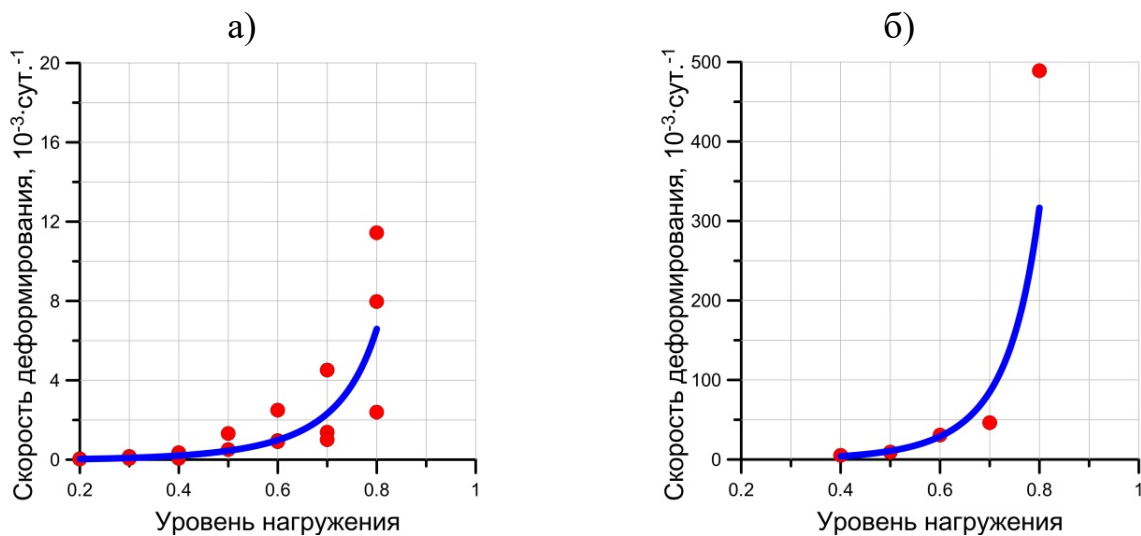


Рис. 7. Характер изменения скорости установившейся ползучести от уровня нагружения сильвинитовых образцов: а – одноосное сжатие ($h/b = 2,0$); б – объемное сжатие ($\sigma_2 = \sigma_3 = 5,0$ МПа)

Время разрушения каждого соляного образца вычислялось путем экстраполяции стадии установившейся ползучести до критических деформаций. За критический показатель в данной работе принималась деформация разрушения на пределе остаточной прочности, определяемая при условно-мгновенных испытаниях ($\epsilon_{\text{ост}}$).

Далее по рассчитанным значениям уровней нагружения (7) и времени разрушения образцов строились расчетные кривые длительной прочности для каждой партии сильвинита, пример которых для одноосного и объемного сжатия приведен на рис. 8.

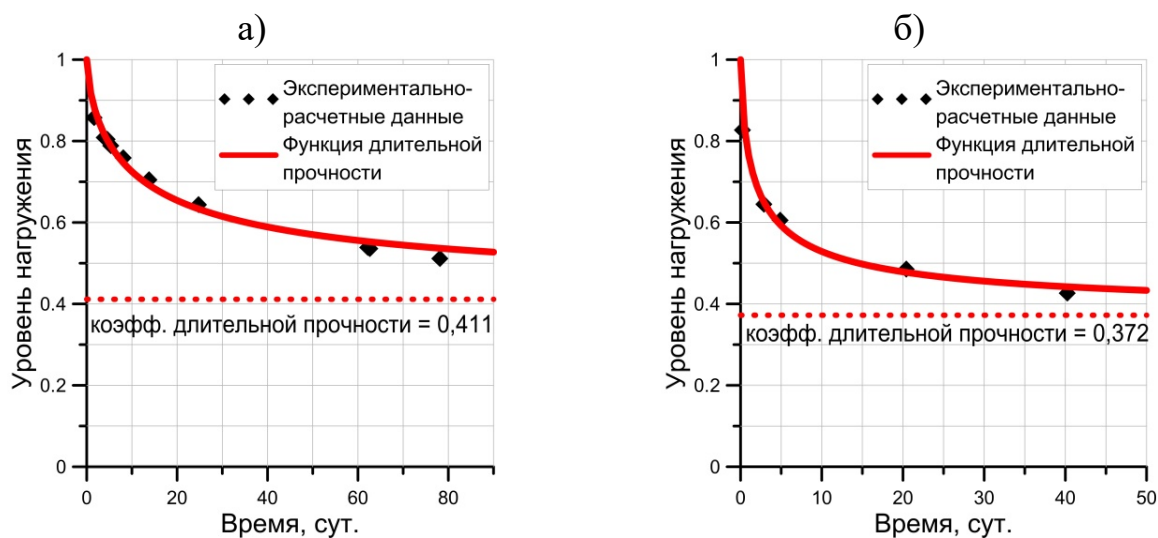


Рис. 8. Пример расчетных кривых длительной прочности: а – одноосное сжатие ($h/b = 2,0$); б – объемное сжатие ($\sigma_2 = \sigma_3 = 5,0$ МПа)

Для аналитической аппроксимации расчетных кривых длительной прочности предложена функция следующего вида:

$$1 - K = (1 - K_{\infty}) \cdot \frac{t_p^{0,7}}{t_p^{0,7} + B}, \quad (8)$$

где $K_{\infty} = \sigma_{\infty}/\sigma_{пр}$ – коэффициент длительной прочности; σ_{∞} – предел длительной прочности, МПа; B – параметр аппроксимации. Определение коэффициента длительной прочности и параметра аппроксимации B проводилось с помощью преобразования Лайнвивера-Берка.

Анализ результатов определения реологических параметров показал удовлетворительную сходимость с прямым методом. Кроме этого, использование нового метода позволяет сократить время проведения длительных испытаний до 5 – 7 дней, так как в большинстве случаев выход сильвинитовых образцов на стадию установившейся ползучести осуществлялся уже на 3 – 5 сутки проведения длительных экспериментов.

С целью более детального изучения процессов деформирования сильвинитовых пород во времени, часть лабораторных испытаний на одноосную ползучесть проводилась с измерениями как продольных, так и поперечных деформаций, с аналогичной оценкой скоростей установившейся ползучести. По вышеизложенной методике определялся коэффициент длительной прочности, результаты которого практически совпали с результатами, полученными при измерении скоростей продольных деформаций, отличие составило менее одного процента. Таким образом, представленная выше методика, основанная на условно-мгновенных и кратковременных длительных испытаниях, может быть рекомендована для относительно точного определения предела длительной прочности соляных пород при измерении как продольных, так и поперечных деформаций.

Также, результаты проведенных исследований позволили установить, что на предел длительной прочности влияет как форма образцов, так и уровень бокового давления. С уменьшением высоты сильвинитовых образцов и увеличением уровня бокового давления предел длительной прочности – увеличивается. Подобная зависимость прослеживается и с коэффициентом длительной прочности.

С практической точки зрения наибольший интерес представляет зависимость изменения предела длительной прочности от формы сильвинитовых образцов. В связи с этим на основании реологических испытаний соляных пород, представленных в данной главе, и ранее выполненных исследований, выведена зависимость изменения коэффициента формы для предела длительной прочности от отношения ширина b целика к высоте m (рис. 9), которая может быть аппроксимирована следующим линейным выражением:

$$k_f^{\infty} = 0,62 \left(\frac{b}{m} \right) + 0,38 \text{ при } b/m < 1. \quad (9)$$

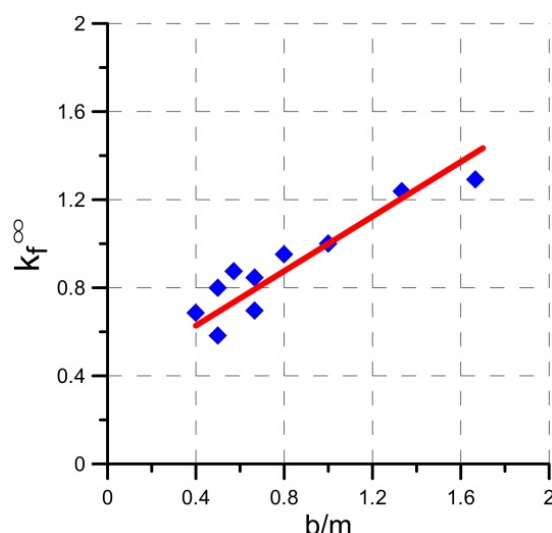


Рис. 9. Зависимость изменения коэффициента формы для предела длительной прочности от отношения b/m

Соотношение (9) по своей сути является основой для корректировки нормативной (допустимой) степени нагружения МКЦ в зависимости от их расчетной ширины к высоте. Так для условий ВКМКС было предложено записывать базовый критерий расчета грузонесущих элементов камерной системы разработки в следующем виде:

$$C \leq k_f^\infty [C] \text{ при } b/m < 1. \quad (10)$$

Сравнительный анализ допустимой степени нагружения МКЦ по нормативному документу и скорректированной по новым рекомендациям (10) показал, что для большинства участков ВКМКС с повышенными скоростями деформирования отношение ширины междукammerных целиков к их высоте составляет меньше 1 («высокие» целики). Тем самым можно объяснить повышенные оседания и скорости деформирования грузонесущих элементов, так как скорректированная допустимая степень нагружения ($k_f^\infty [C]$) меньше регламентируемой ($[C]$) в среднем на 13 %. Для сохранения их устойчивого состояния в течение длительного периода времени требуется снижение действующих нагрузок.

В пятой главе приведена усовершенствованная методика определения несущей способности соляных междукammerных целиков с учетом их длины, слоистости и реологических свойств пород. На основании проведенных исследований определение расчетной ширины междукammerных целиков (b) при заданной ширине очистных камер (a_m) и нормативной степени нагружения ($[C]$) будет производиться с помощью итерационной процедуры с точностью (ϵ), блок-схема которой представлена на рис. 10.

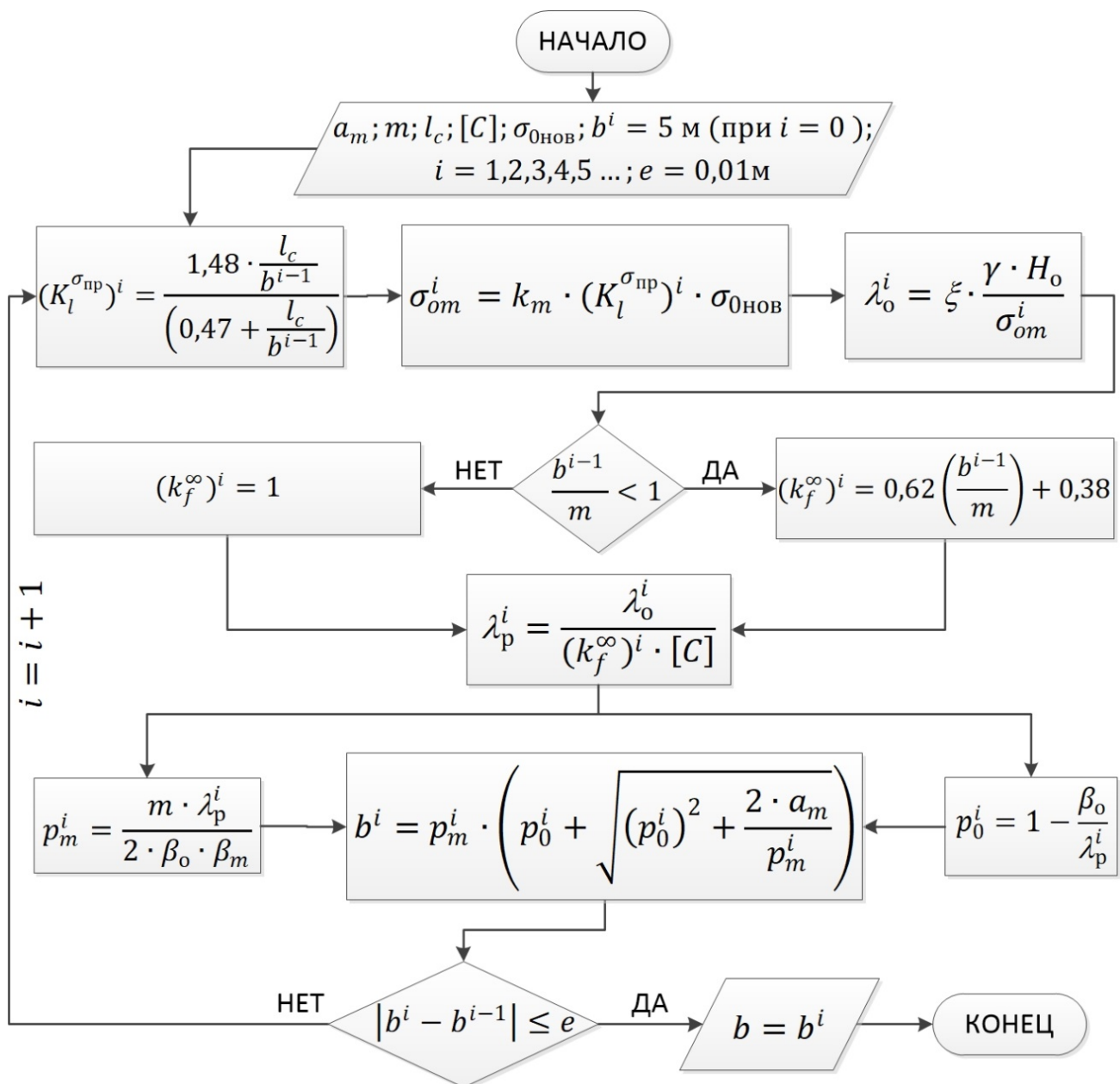


Рис. 10. Блок-схема итерационного процесса определения расчетной ширины соляных междукammerных целиков

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе по результатам проведенных исследований предложено решение актуальной научно-практической задачи по совершенствованию методов расчета несущей способности междукammerных целиков, имеющее важное значение для безопасной отработки месторождений калийных руд.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. С целью оценки влияния формы на деформирование и разрушение соляных целиков проведен комплекс лабораторных исследований на прямоугольных образцах сильвинита различной длины и высоты, общее количество испытанных образцов составило 220 шт.

2. Установлено, что с увеличением длины образца происходит увеличение предела прочности, разрушающей деформации и удельной энергоемкости разрушения. Касательный модуль деформации, модуль упругости и модуль спада имеют тенденцию к снижению при увеличении длины образцов.

3. Построены зависимости влияния формы сильвинитовых образцов (целиков) на следующие механические показатели: предел прочности, разрушающая деформация, касательный модуль деформации, модуль упругости, модуль спада, а также удельная энергоемкость разрушения. Получены предельные значения физико-механических показателей при сжатии «бесконечно» длинного целика.

4. С целью оценки влияния неоднородности соляных целиков на их несущую способность проведено исследование влияния слабого слоя на прочность слоистых образцов при сжатии, общее количество изготовленных образцов составило более 850 шт.

5. По результатам определения прочностных свойств построены зависимости изменения прочности слоистых образцов от толщины слабого слоя. Установлено, что практически для всех блоков экспериментальные значения предела прочности существенно отличаются от расчетных значений, полученных по формуле гармонического средневзвешенного.

6. Разработана новая расчетная зависимость определения эквивалентной прочности слоистых соляных целиков, адекватно отражающая изменение их несущей способности при значительной вариации прочностных характеристик и толщин слагающих слоев.

7. Проведен комплекс лабораторных исследований при условно-мгновенном и длительном нагружении сильвинитовых образцов в условиях одноосного и объемного сжатия, общее количество испытанных образцов составило более 400 шт.

8. Разработана методика определения предела длительной прочности соляных пород при кратковременной одноосной и объемной ползучести.

9. На основании реологических испытаний соляных пород выведена зависимость изменения коэффициента формы для предела длительной прочности от отношения ширина целика к его высоте, которая может быть использована для корректировки допустимой степени нагружения междукammerных целиков на участках шахтных полей ВКМКС.

10. Разработана методика определения параметров камерной системы разработки для условий Верхнекамского месторождения с учетом длины, слоистости и реологических свойств пород, слагающих междукammerные целики.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и в изданиях индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science:

1. Паньков И.Л. Изучение влияния степени нагружения и формы образцов на деформирование соляных пород при ползучести / И.Л. Паньков, В.А. Асанов, **А.А. Ударцев** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 1. – С. 246-252.

2. Морозов И.А. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях / И.А. Морозов, **А.А. Ударцев**, И.Л. Паньков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 10. – С. 16-28. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.

3. Baryakh, A.A. Experimental justification of the fracture criteria of interchamber pillars / A.A. Baryakh, A.V. Evseev, **A.A. Udartsev** // ISRM International Symposium - EUROCK 2020, Trondheim, Virtual, 14–19 июня 2020 года. – Trondheim, Virtual, 2020.

4. Udartsev A. The study of silvinite and carnallite deformations under instantaneous and sustained loading / **A. Udartsev**, I. Pankov // Procedia Structural Integrity : 22nd, Perm, 22–26 марта 2021 года. Vol. 32. – Perm, 2021. – P. 187-193. – DOI 10.1016/j.prostr.2021.09.027.

5. Ударцев А.А. Определение прочностных свойств слоистых образцов, зготовленных методом сплошной заливки / **А.А. Ударцев**, А.А. Асанов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 1-1. – С. 404-412. – DOI 10.46689/2218-5194-2023-1-1-404-412.

6. Барях А.А. К оценке длительной прочности соляных пород / А.А. Барях, **А.А. Ударцев**, И.Л. Паньков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 11. – С. 5-22. – DOI 10.25018/0236_1493_2024_11_0_5.

7. Ударцев А.А. Исследование влияния слабого слоя на несущую способность соляных целиков / **А.А. Ударцев**, И.Л. Паньков, М.А. Ворожцова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 822-834.

В прочих изданиях:

1. Паньков И.Л. Экспериментальное изучение деформирования соляных пород при ползучести / И.Л. Паньков, **А.А. Ударцев** // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2011. – № 11. – С. 205-207.

2. Паньков И.Л. Экспериментальное изучение ползучести сильвинита на образцах различной высоты / И.Л. Паньков, **А.А. Ударцев** // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5, № 4. – С. 36-38.

3. Паньков И.Л. Особенности деформирования и разрушения соляных пород / И.Л. Паньков, В.А. Асанов, **А.А. Ударцев** [и др.] // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях : Материалы научно-практической конференции, посвященной 25-летию Горного института Уро РАН и 75-летию основателя и первого директора института члена-корреспондента РАН Аркадия Евгеньевича Красноштейна, Пермь, 05–07 июня 2013 года / Горный институт Уро РАН. – Пермь:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2014. – С. 304-311.

4. Ударцев А.А. Исследование ползучести красного сильвинита при различных боковых давлениях / **А.А. Ударцев**, И.Л. Паньков // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2015. – № 1. – С. 270-273.

5. Евсеев А.В. Методика определения нормативной скорости поперечного деформирования междукамерных целиков в лабораторных условиях / А.В. Евсеев, **А.А. Ударцев** // Горное эхо. – 2019. – № 3(76). – С. 31-34. – DOI 10.7242/echo.2019.3.8.

6. Паньков И.Л. Экспериментальные исследования влияния длины прямоугольных образцов сильвинита на коэффициент формы / И.Л. Паньков, **А.А. Ударцев** // Горное эхо. – 2020. – № 3(80). – С. 44-48. – DOI 10.7242/echo.2020.3.8.

7. Ударцев А.А. Экспериментальные исследования влияния толщины ослабленного слоя на прочность слоистых образцов / **А.А. Ударцев** // Горное эхо. – 2021. – № 3(84). – С. 34-38. – DOI 10.7242/echo.2021.3.7.

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

9. Ударцев А.А. Изучение характера деформирования сильвинита в условиях одноосного сжатия при различных режимах нагружения / **А.А. Ударцев**, И.Л. Паньков // Горное эхо. – 2022. – № 4(89). – С. 54-59. – DOI 10.7242/echo.2022.4.9.

10. Ударцев А.А. Изучение скорости деформирования образцов сильвинита различной высоты в условиях ползучести / **А.А. Ударцев** // Горное эхо. – 2023. – № 2(91). – С. 30-35. – DOI 10.7242/echo.2023.2.6.

Сдано в печать _____ 2025 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ
«ГИ УрО РАН»
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а