

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Осипов Юханна Владимирович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ,
ДЕФОРМАЦИОННЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
БИШОФИТОВОЙ ПОРОДЫ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО И
ТРЕХОСНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Специальность 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор Вознесенский Александр Сергеевич

Москва – 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В 2020 г. ПАО «Газпром» приняло программу «Генеральной схемы развития газовой отрасли России на период с 2020 до 2030 года». В числе основных задач в области подземного хранения углеводородов эта программа включает в себя создание подземных хранилищ газа (ПХГ) в отложениях каменной соли. В соответствии с программой продолжается расширение Калининградского и Волгоградского ПХГ, ведется проектирование Новомосковского ПХГ. Данная задача входит в общую проблему разработки и эксплуатации месторождений минеральных солей.

Классическая схема эксплуатации таких месторождений, базирующаяся на опыте подземного растворения и добычи рассолов каменной и калийных солей (карналлит, сильвинит), для бишофитовой породы неприменима. Это обусловлено тем, что бишофитовая порода является сверхгигроскопичной, легкорастворимой по сравнению со всеми другими минеральными солями, добываемыми скважинами. Отсутствует опыт разработки мономинеральных залежей бишофита, таких, как Светлоярское, Городищенское и других из-за непредсказуемых осложнений, возникших при попытках его добычи и вызванных повышенной его текучестью.

При нарушении целостности бишофитовой залежи на каких-либо участках (на объектах рассолодобычи) бишофитовая порода будет проявлять свои ярко выраженные реологические свойства, перераспределяясь в недрах за счет горного давления, деформируя при этом граничащие с бишофитом пласты горной породы, а также «соседние» конструкции. Даже малая вероятность подобного обуславливает необходимость постановки фундаментальных опытных работ и научных исследований по изучению механических свойств бишофитовой породы.

Бишофит был обнаружен немецким химиком и геологом Карлом Оксениусом еще в 1877 г. Несмотря на это на сегодняшний день в публикациях отсутствует его экспериментальное определение прочностных, деформационных и реологических свойств, что определяет актуальность выбранной темы диссертации.

Материалом для данной диссертационной работы послужили результаты, полученные автором при выполнении исследований в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): проект № 20-05-

00341 «Влияние связных и несвязных границ раздела горных пород различных типов на их прочность во взаимосвязи с акустическими свойствами при циклических нагружениях».

Целью работы является определение механических свойств бишофитовой породы в условиях одноосного и трехосного напряженного состояния для проектирования, строительства и эксплуатации подземных сооружений в соляных отложениях.

Идея работы заключается в учете сильно выраженных реологических свойств бишофитовой породы при механических испытаниях в условиях напряженного состояния, соответствующего глубинам ее естественного залегания.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

- экспериментально оценить возможность использования существующего стандартного метода определения деформационных свойств горных пород для бишофитовой породы;
- установить зависимости предела прочности бишофитовой породы в сравнении с каменной солью от величины бокового давления в условиях трехосного напряженного состояния;
- выявить закономерности изменения деформаций бишофитовой породы во времени в условиях одноосного и трехосного напряженного состояния;
- разработать программное обеспечение для расчета и построения кривых ползучести бишофитовой породы при различных задаваемых значениях разности осевого и бокового напряжений.

Основные научные положения и их новизна

1. Впервые установлено, что деформационные свойства бишофитовой породы следует определять на участках деформационных кривых, соответствующих возрастанию нагрузки, так как при стандартном циклическом испытании с возрастающей максимальной нагрузкой в каждом последующем цикле на участке разгрузки образца бишофитовой породы продольные деформации не уменьшаются, а, напротив, увеличиваются из-за отчетливого проявления реологических свойств.

2. Экспериментально доказано, что при одинаковых величинах бокового давления значения пределов прочности образцов бишофитовой породы меньше,

чем у каменной соли не менее, чем в два раза, сцепление меньше в три раза, а углы внутреннего трения этих пород практически одинаковы.

3. Реологические свойства бишофитовой породы в режиме одноосного ступенчатого нагружения проявляются при абсолютных напряжениях выше 0,5 МПа, а для каменной соли выше 5 МПа, при этом для нормированных по максимуму на каждой ступени величин деформаций ползучесть у бишофитовой породы проявляется при относительных деформациях выше 0,0013 и напряжениях выше 0,19, а у каменной соли – выше 0,11 и 0,43 соответственно.

4. В трехосном напряженном состоянии ползучесть образцов бишофитовой породы при разности главных напряжений $\Delta\sigma$ менее 2 МПа не проявляется, в диапазоне от 2 до 5 МПа проявляется установившаяся ползучесть, а при $\Delta\sigma$ более 8 МПа проявляется прогрессирующая ползучесть, при этом падение осевого давления до 24 % не оказывает существенного влияния на скорость ползучести бишофитовой породы во время проведения реологических испытаний.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- достаточным количеством экспериментальных данных по определению прочностных, деформационных и реологических свойств бишофитовой породы, необходимым для обеспечения статистической значимости результатов;
- стабильностью химического состава по всем исследованным образцам бишофитовой породы, что дало основание для испытания их в одной группе;
- применением при проведении экспериментальных исследований поверенного измерительного и испытательного оборудования с высокими метрологическими свойствами, позволяющего получать корректные результаты, как в режиме одноосного сжатия, так и в трехосном напряженном состоянии;
- удовлетворительной сходимостью результатов, полученных при помощи лабораторных исследований на образцах бишофитовой породы и численным моделированием;
- применением для обработки экспериментальных данных программных пакетов хорошо зарекомендовавших себя при аналогичных экспериментах.

Методы исследований включали: анализ литературных источников научно-технической информации при оценке современного уровня исследований в данной области и постановке цели и задач исследований; экспериментальные исследования на образцах бишофитовой породы,

учитывающие задание различных схем, видов и режимов нагружения и дальнейший теоретический анализ их результатов; обработку результатов испытаний с использованием специально написанных компьютерных программ и современного программного обеспечения для обработки данных.

Практическая значимость и реализация результатов

Получена феноменологическая модель, которая включает в себя параметры упругости и параметры вязкости. Данная модель удовлетворительно описывает кривые ползучести образцов бишофитовой породы. Показано, что с увеличением разности главных напряжений параметры упругости и параметры вязкости уменьшаются, что описывает последовательный переход бишофитовой породы от упругой стадии к затухающей, установившейся и прогрессирующей ползучести.

Все полученные результаты диссертационной работы в виде численных данных по экспериментальным кривым ползучести бишофитовой породы, а также разработанная программа для ЭВМ «Программа для расчета и построения кривых ползучести горных пород при заданном напряжении В-Среер, версия 1.0» переданы в ООО «Газпром геотехнологии» для практического использования.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на XII и XIII Всероссийских конференциях молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика) (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва 2017 и 2019 гг.); на Международной научно-практической конференции «Физико-химическая геотехнология – инновация и тенденции развития» (НИТУ «МИСиС», Москва 2020 г.); на 74-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2020» (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва 2020 г.); на XXVIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2020» (НИТУ «МИСиС», Москва 2020 г.); на 76-ой Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2022» (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва 2022 г.), на XXXI Международном научном симпозиуме Неделя горняка – 2023 (НИТУ МИСИС, 31 января – 3 февраля 2023 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 5 из них в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и 3 в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science.

Структура и объём работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и 1 приложения, изложенных на 140 страницах машинописного текста, включает 72 иллюстрации, 17 таблиц, список использованных источников из 134 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* анализируется современное состояние в области экспериментального изучения процессов деформирования и разрушения соляных горных пород.

В процессе бурения в хемогенных отложениях возникают осложнения, связанные со специфическими горно-геологическими условиями залегания и слабой изученности механических свойств бишофитовой породы: прочностных, деформационных и реологических свойств.

В связи с этим, одним из важных факторов при проведении таких горных выработок является определение механических свойств горных пород различных типов, к которым относятся галогенные породы и, в частности, бишофит. Их знание дает возможность прогнозировать устойчивость массива пород вокруг выработок на длительный срок, что важно для практики.

Проведенный анализ публикаций показал, что хотя бишофит известен науке достаточно давно, экспериментальные исследования прочностных, деформационных и реологических свойств бишофитовой породы в условиях одноосного и трехосного напряженного состояний отсутствуют. Поэтому такие исследования представляются перспективными, а выбранная тема работы – актуальной.

Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение сформулированных в общей характеристике работы задач исследования.

Во *второй главе* рассмотрены подготовка образцов, а также измерительное и испытательное оборудование для проведения исследований.

При проведении экспериментов, необходимых для выполнения поставленных диссертационных задач использовалось современное оборудование, позволяющее испытать образцы бишофита как в одноосном режиме, так и в сложном напряженном состоянии. Подробно описаны все этапы подготовки образца к исследованию: от поступления кернового материала до получения первичных данных для дальнейшей интерпретации.

Химический анализ исследуемых образцов бишофита с содержанием галита показал следующее содержание солей: $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ от 65 до 68%, NaCl от 32 до 35%. Химический состав по всем образцам показал полную идентичность, что дало основание для их испытаний в одной группе.

Третья глава посвящена экспериментальному определению прочностных свойств бишофитовой породы в одноосном и трехосном напряженном состоянии, а также определению ее деформационных характеристик в условиях одноосного напряженного состояния.

Предварительно, перед определением деформационных свойств бишофитовой породы, на 12 образцах были проведены испытания по определению предела прочности при одноосном сжатии. По всем испытанным образцам среднее значение предела прочности при одноосном сжатии составило 5,9 МПа.

Среднее значение предела прочности при одноосном растяжении образцов бишофитовой породы составило 0,68 МПа.

С целью определения деформационных свойств всего было испытано 11 образцов бишофитовой породы и 26 образцов каменной соли для сравнения.

По результатам испытаний строились полные диаграммы деформирования образцов бишофита $\sigma_1=f(\epsilon_1)$, а также график зависимости $\epsilon_3=f(\epsilon_1)$. Пример полной диаграммы деформирования образца бишофита №8-3-1 представлен на рисунке 1.

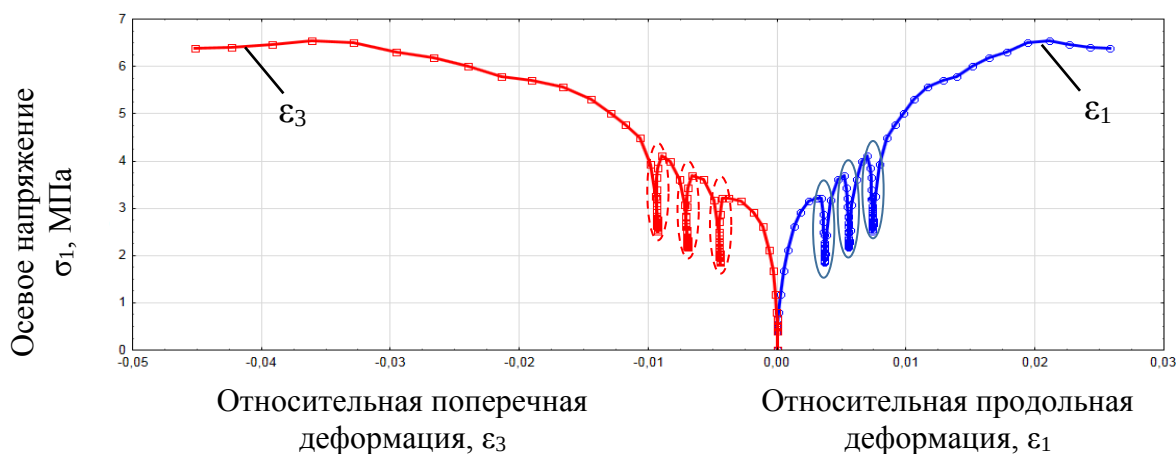
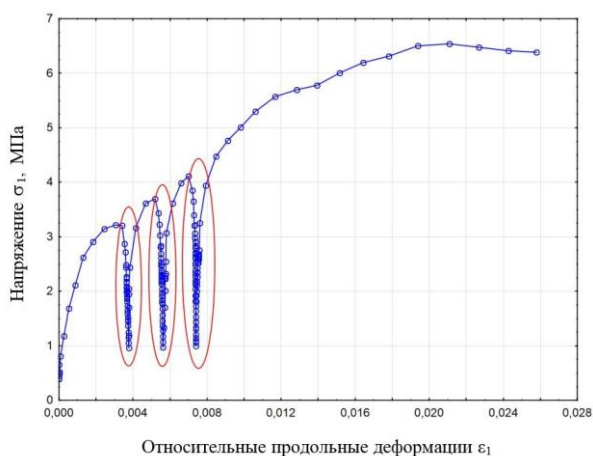


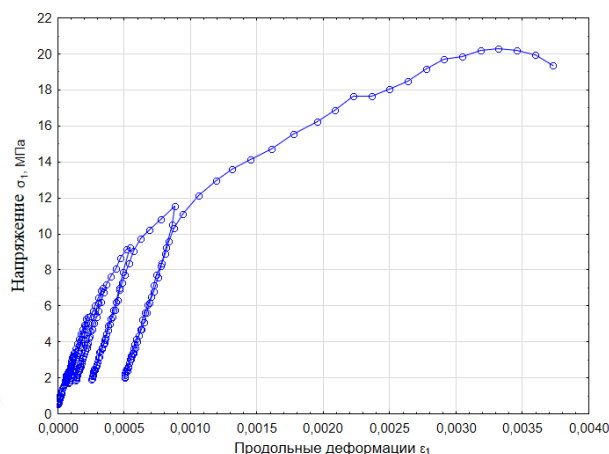
Рисунок 1 – Полная диаграмма деформирования образца бишофита №8-3-1

Была обнаружена интересная особенность деформирования образцов бишофита при построении зависимостей продольных и поперечных деформаций от напряжения. На рисунке 2 приведено сравнение зависимостей продольных

деформаций от напряжения образца бишофита №8-3-1 и образца каменной соли №74-2.



(а)



(б)

Рисунок 2 – График зависимости продольных деформаций от нагрузки образца бишофита №8-3-1 (а) и образца каменной соли №74-2 (б)

Наиболее характерным участком деформирования для пластических горных пород «разгрузка-нагрузка» является петля, похожая на петлю гистерезиса, пример для образца каменной соли представлен на рисунке 2 (б). Как видно из графика 2 (а) ветвь «разгрузка-нагрузка» бишофита (выделенные участки на рисунке красным цветом) носит характер «галочки», что совсем не характерно для горных пород. Это обстоятельство объясняется тем, что даже при незначительном воздействии нагрузки образцы бишофита начинают деформироваться. Когда нагрузка на образец снижается (ветвь разгрузки) он все равно показывает прирост осевых деформаций, т.е. происходит дальнейшее деформирование.

ГОСТ 28985-91 регламентирует определять упругие свойства горных пород, в том числе соляных, на участках ветвей «разгрузка», когда образец может либо полностью, либо отчасти проявлять свои упругие деформации без значительного проявления упругопластических и пластических свойств. В случае с бишофитом определение упругих свойств по деформациям на ветви «разгрузка» по данной методике невозможно, поскольку дает отрицательные значения. Зато дальнейшая ветвь «нагрузка» до ранее действующего максимального значения носит прямолинейный характер и вполне отвечает всем требованиям. На этих ветвях были определены упругие свойства: модуль

упругости и коэффициент Пуассона. Модуль деформации определялся по вышеописанной методике, регламентированной ГОСТом.

Статистическая обработка результатов определения деформационных свойств образцов бишофита и каменной соли приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические параметры деформационных свойств образцов бишофита и каменной соли

Наименование горной породы	Бишофитовая порода			Каменная соль		
Статистические параметры	E_d , МПа	E_y , МПа	Коэффициент Пуассона ν	E_d , МПа	E_y , МПа	Коэффициент Пуассона ν
Среднее значение	623	3875	0,40	2642	26232	0,22
Стандартное отклонение	240	687	0,09	746	3040	0,04
Коэффициент вариации, %	39	18	24	28,2	11,6	16,3

Бишофит и каменная соль обладают существенно различными свойствами, как следует из данных таблицы 1. Средние значения модуля деформаций и модуля упругости каменной соли выше этих свойств бишофита в 4,24 и 6,77 раз соответственно. В то же время коэффициент Пуассона в 1,81 раза выше у бишофита.

Определение прочностных свойств бишофитовой породы в сложном напряженном состоянии проводилось на 19 образцах бишофитовой породы.

В таблице 2 и 3 представлены элементы статистической обработки полученных значений пределов прочности при объемном сжатии по испытанным образцам бишофитовой породы и каменной соли.

Таблица 2 – Статистические параметры пределов прочности при объемном сжатии по испытанным образцам бишофитовой породы

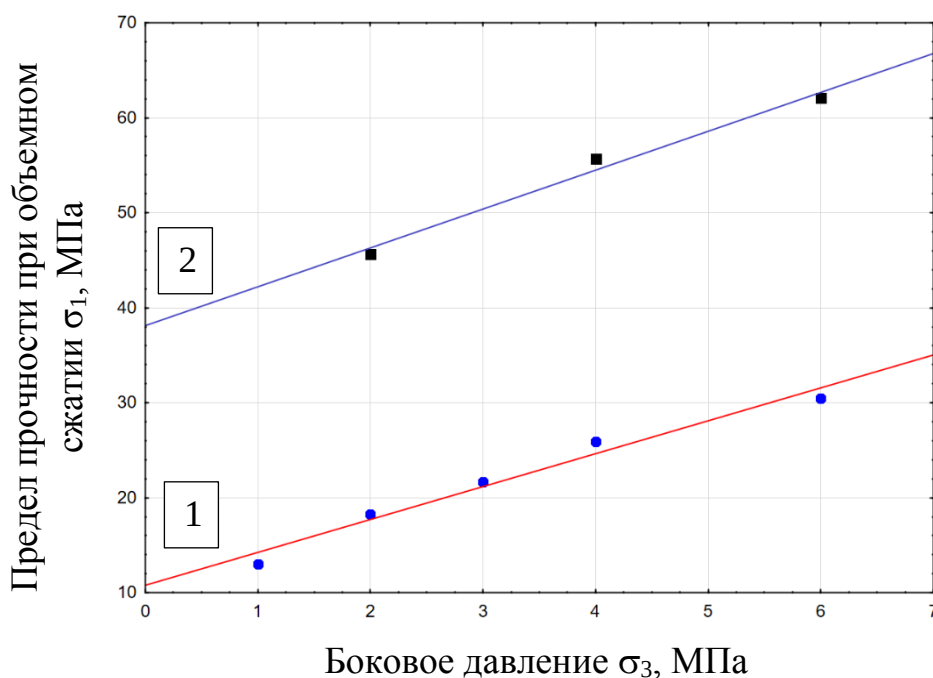
Количество испытанных образцов	Боковое давление $\sigma_2=\sigma_3$, МПа	Среднее значение предела прочности при объемном сжатии, МПа	СКО, МПа	Коэффициент вариации, %
3	1	13,0	2,4	18,4
3	2	18,3	1,2	6,6
3	3	21,7	1,2	5,6
3	4	25,9	2,1	7,9
5	6	30,5	1,8	5,8

Таблица 3 – Статистические параметры пределов прочности при объемном сжатии по испытанным образцам каменной соли

Количество испытанных образцов	Боковое давление $\sigma_2=\sigma_3$, МПа	Среднее значение предела прочности при объемном сжатии, МПа	СКО, МПа	Коэффициент вариации, %
5	2	45,7	1,0	2,0
5	4	55,7	1,5	3,0
5	6	62,1	3,0	5,0

Как видно из таблицы 2, с увеличением бокового давления увеличивается и значение предела прочности при объемном сжатии образцов бишофита.

На рисунке 3 по данным таблицы 2 и 3 была построена зависимость предела прочности при объемном сжатии от бокового давления для образцов бишофитовой породы и каменной соли.



1 – образцы бишофитовой породы; 2 – образцы каменной соли

Рисунок 3 – Зависимость предела прочности при объемном сжатии от бокового давления

Уравнение регрессии такой зависимости для образцов бишофитовой породы имеет линейный вид $\sigma_1=10,8054+3,4608 \cdot \sigma_3$, а для образцов каменной соли $\sigma_1=38,1+4,1 \cdot \sigma_3$.

Для построенного паспорта прочности, огибающей предельных кругов Мора, выделяются характерные прямолинейные участки, соответствующие определенным интервалам напряжений. На каждой огибающей выбирается столько характерных прямолинейных участков, количество которых охватывает весь интервал напряжений, в которых построена огибающая. На этих участках проводились касательные прямые линии, пересечение которых с осью τ (т.е. координата пересечения прямой линии с осью τ) является коэффициент сцепления C на данном участке напряжений для данной разновидности каменной соли. Тангенсы угла наклона этих прямых являются коэффициентами внутреннего трения, а углы наклона φ являются углами внутреннего трения.

В таблице 4 приведены граничные значения для каждого выделенного участка напряжений σ , τ , а также значения сцепления и угла внутреннего трения на данных участках.

Таблица 4 – Граничные значения аппроксимации прямолинейных участков паспортов прочности образцов бишофита с Волгоградского месторождения, скважина №5т

Участок	Касательное напряжение τ , МПа	Нормальное напряжение σ , МПа	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , градусы
1	0-4,69	-0,76-2,78	1,5	49
2	4,69-10,08	2,78-9,9	2,5	37
3	10,08-12,23	9,9-15,69	6,3	22

Приведенные результаты подтверждают обоснованность и достоверность *первого и второго научных положений*.

Четвертая глава посвящена экспериментальному определению реологических свойств бишофитовой породы в режиме одноосного ступенчатого нагружения.

Величина напряжения на первой ступени составляла 0,5 МПа или 8,5% от предела прочности при одноосном сжатии. Напряжение на последующих ступенях увеличивалось на 0,5 МПа по сравнению с напряжением на предыдущей ступени. Продолжительность действия напряжения на каждой ступени составляла 24 часа. В ходе испытаний было установлено, что из-за

ползучести образец бишофита разрушался уже на четвертой или пятой ступенях нагружения.

На рисунке 4 в качестве примера приведен график ступенчатого нагружения образца бишофита №10-6-2 вплоть до его перехода на конечную стадию прогрессирующей ползучести.

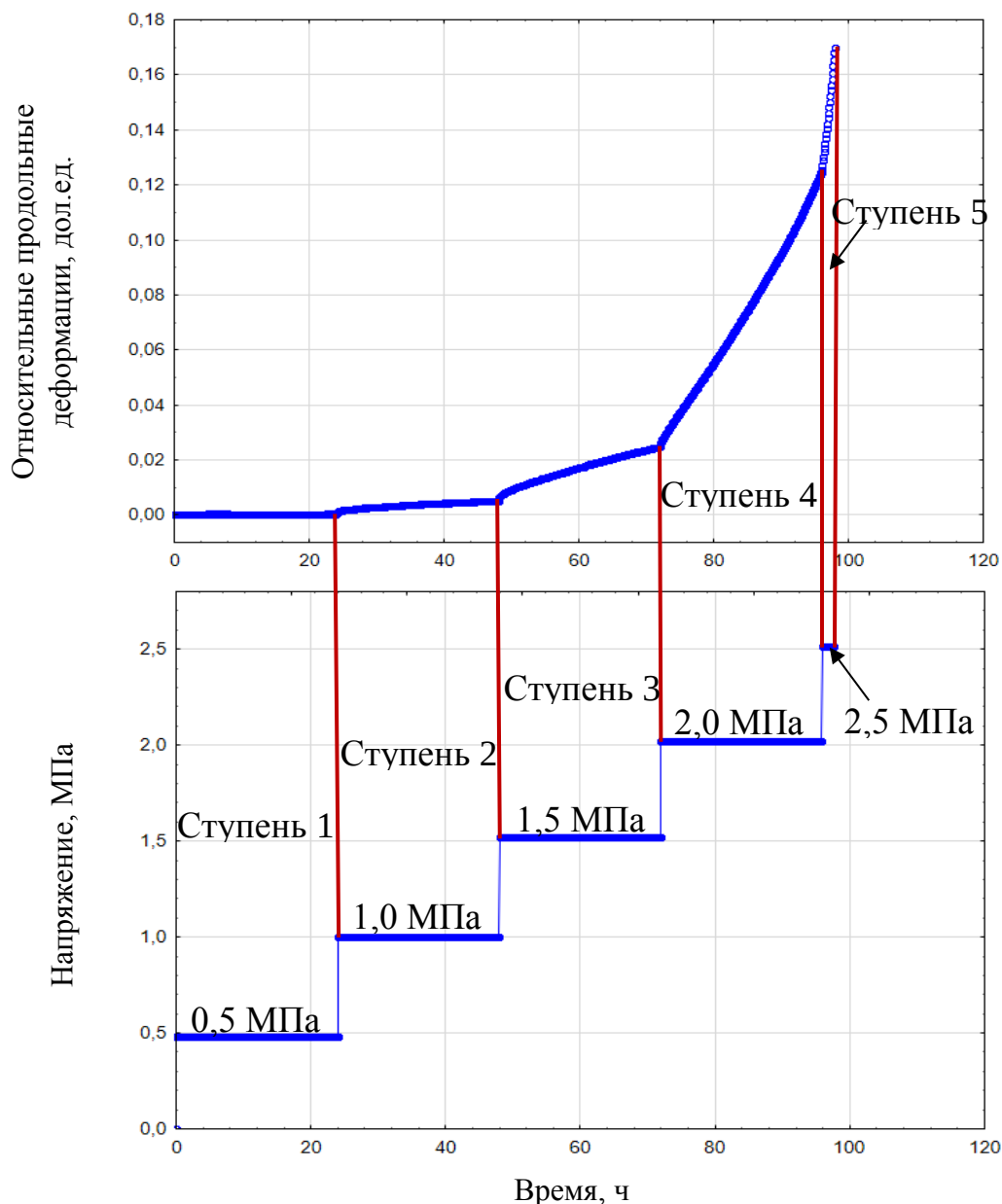


Рисунок 4 – Ступенчатое нагружение образца бишофита №10-6-2 (рисунок снизу) и кривые его ползучести (рисунок сверху)

Для наглядного механико-математического описания свойств бишофита были использованы феноменологические реологические модели процессов ползучести в таком образце, представляющие собой различные комбинации упругого и вязкого элементов. Модель (1) представлена в виде суммы

математических выражений, описывающих упругое деформирование, а также затухающую, установившуюся и прогрессирующую ползучести.

$$\varepsilon(t, \sigma) = \frac{\sigma}{E_1} + \left(\frac{\sigma}{E_2} - \frac{\sigma}{E_1} \right) \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) + \left(\frac{\sigma}{\eta_1} \right) t + \left(\frac{\sigma}{E_3} - \frac{\sigma}{E_1} \right) \left(e^{\frac{t}{\tau_3}} - 1 \right), \quad (1)$$

где σ – напряжение, МПа;

E_1 – первый параметр упругости модели образца бишофита, МПа;

E_2 – второй параметр упругости модели, характеризующий соотношение упругой деформации и деформации затухающей ползучести образца бишофита, МПа;

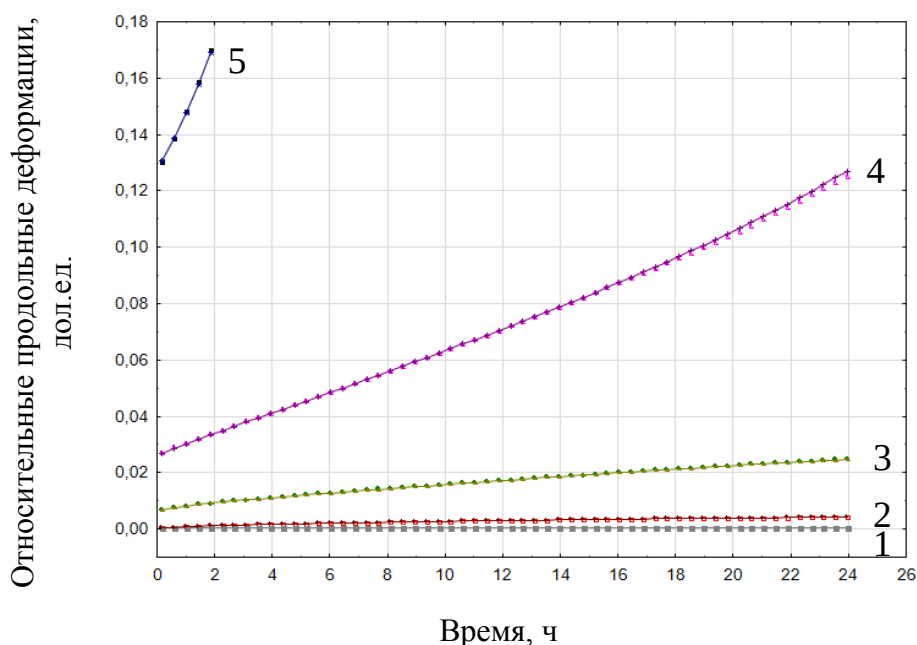
η_2 – второй параметр вязкости модели, МПа·ч;

η_1 – первый параметр вязкости модели, характеризующий установившуюся ползучесть, МПа·ч;

E_3 – третий параметр упругости модели, характеризующий влияние прогрессирующей ползучести, МПа;

τ_3 – параметр возрастания деформаций прогрессирующей ползучести, ч.

Формула (1) хорошо описывает деформирование образца на всех ступенях нагружения, что видно из рисунка 5, где в виде точек представлены экспериментальные данные, а в виде линий – аппроксимирующие их кривые в соответствии с формулой (1).



1 – 0,5 МПа; 2 – 1,0 МПа, 3 – 1,5 МПа, 4 – 2,0 МПа, 5 – 2,5 МПа

Рисунок 5 – Экспериментальные кривые ползучести образца бишофита №10-6-2: фигурные точки – экспериментальные данные; сплошные линии – результат аппроксимации по формуле (1)

Необходимо отметить, что по всем испытанным образцам бишофита и каменной соли значения параметров упругости модели, параметров вязкости модели и постоянной времени уменьшаются с проявлением той или иной стадии ползучести, характерной для данной ступени. Если значение какого-то из параметров высокое, это говорит о том, что на данной ступени отсутствует или проявляет себя крайне незначительно ползучесть образца. Такие значения носят формальный характер и позволяют судить о том, что ползучесть проявится через большое время. По всем испытанным образцам общая тенденция такая, что с увеличением напряжения на ступени значения параметров упругости, параметров вязкости и постоянной времени уменьшаются.

Для того, чтобы наглядно показать, как деформировались образцы бишофита и образцы каменной соли под нагрузкой, полученные результаты нормировались к их максимальным значениям. Ниже на рисунке 6 приведены графики зависимостей деформаций от времени для образца бишофита и каменной соли.

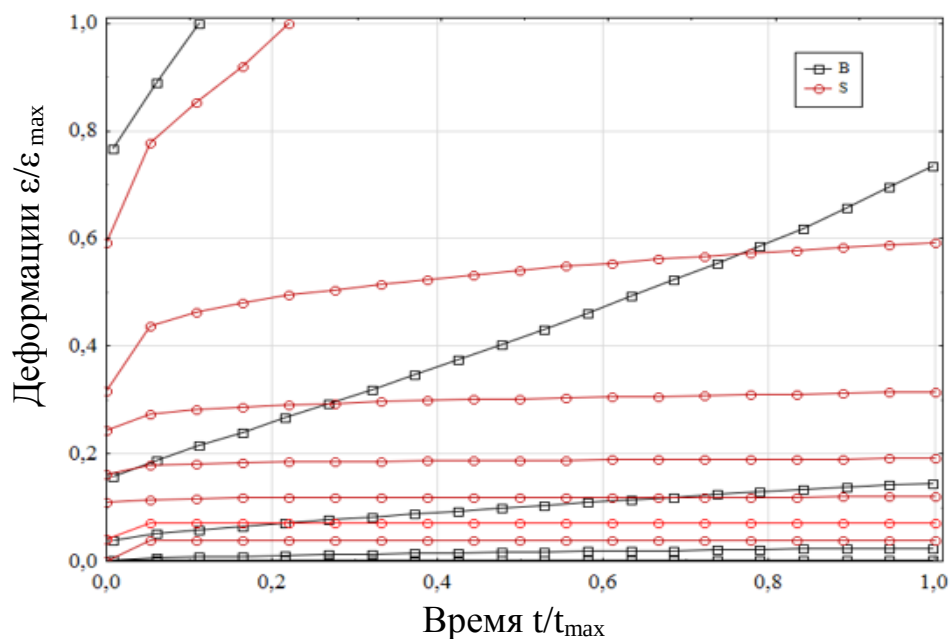


Рисунок 6 – Нормированные кривые ступенчатого нагружения образца бишофита №10-6-2 и каменной соли №36-9-2: B - бишофит, S - каменная соль

Как видно из рисунка 6, ползучесть у образца бишофита начинает проявляться на более низком уровне при значении относительных деформаций $\varepsilon/\varepsilon_{\max}$ выше 0,0013 и относительного напряжения $\sigma/\sigma_{\max}$ выше 0,19, а у каменной соли выше 0,11 и 0,43 соответственно. Это говорит о том, что даже при незначительном механическом воздействии образцы бишофита проявляют свои

ярко выраженные реологические свойства. Тем самым подтверждается *третье научное положение*.

Пятая глава посвящена экспериментальному определению реологических свойств бишофитовой породы в трехосном напряженном состоянии.

Сумма главных напряжений соответствовала глубине, на которой залегал данный керновый материал. По результатам обработки экспериментальных данных построены графики зависимостей $\varepsilon_1=f(\Delta\sigma,t)$ и $\varepsilon_2=\varepsilon_3=f(\Delta\sigma,t)$, представленные на рисунках 7 – 8.

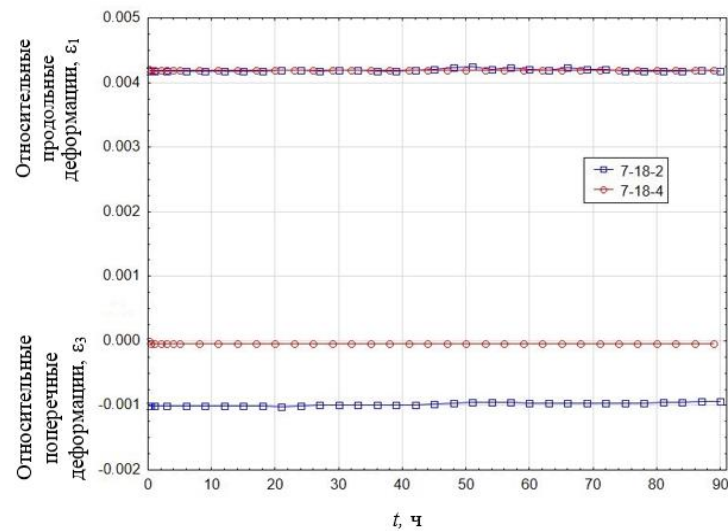


Рисунок 7 – Зависимость продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени образцов бишофита №7-18-2 и №7-18-4 при $\Delta\sigma = 2$ МПа

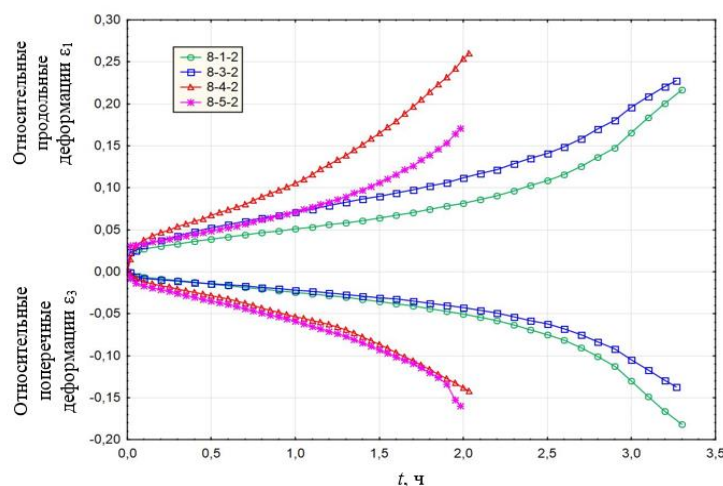


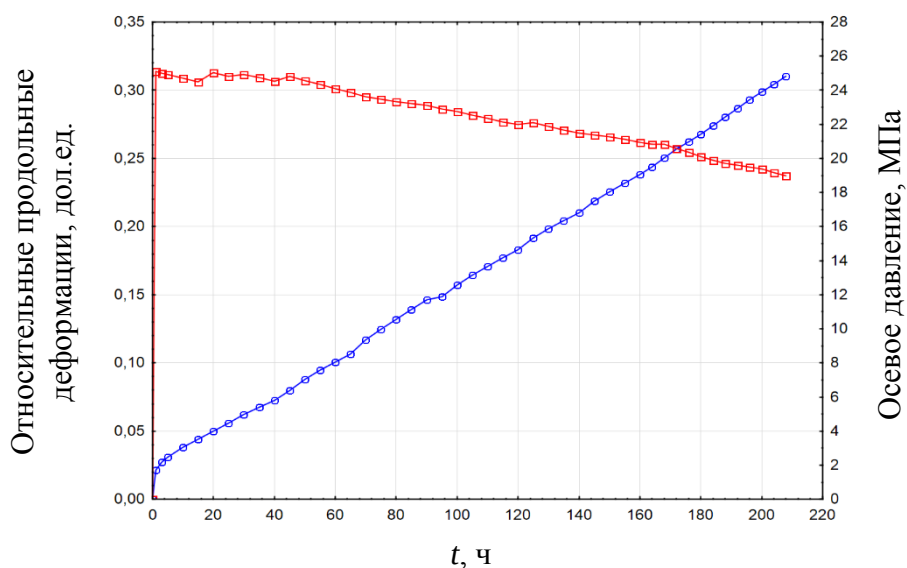
Рисунок 8 – Зависимость продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени образцов бишофита №8-1-2, №8-3-2 при $\Delta\sigma = 14$ МПа; №8-4-2, №8-5-2 при $\Delta\sigma = 17$ МПа

В процессе испытаний выяснилось, что в диапазоне разностей главных напряжений 11–17 МПа скорость деформирования образцов бишофита была слишком большой, что приводило уже в течение нескольких часов к их переходу в прогрессирующую ползучесть. В отличие от образцов бишофита для образцов каменной соли в объемном напряженном состоянии такой переход нехарактерен. При разности главных напряжений 2 МПа какие-либо проявления реологических процессов в образцах бишофита отсутствовали, и такие испытания, с целью экономии образцов, в дальнейшем не проводились. Поэтому испытания образцов бишофита были проведены при разности главных напряжений в диапазоне от 5 до 17 МПа, что представлено на рисунках 7–8. Уже при разности главных напряжений 5 МПа бишофит проявил свои ярко выраженные реологические свойства. Было установлено, что при увеличении разности главных напряжений уменьшается время, которое необходимо образцу для перехода в прогрессирующую ползучесть.

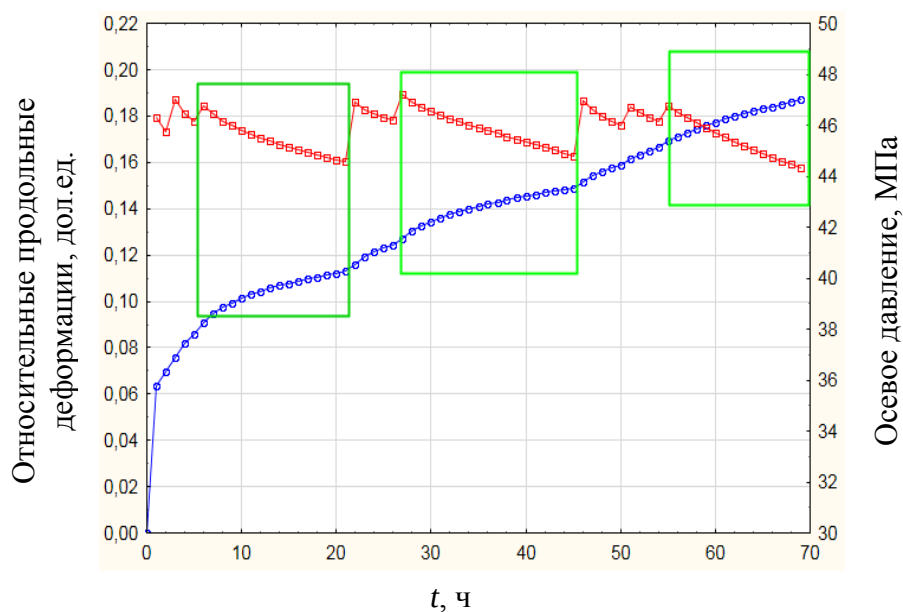
В отличие от образцов каменной соли при уменьшении осевых напряжений в образце бишофита вследствие его деформирования и роста поперечного сечения скорость ползучести не затухает, а остается постоянной. Этот факт представлен на рисунке 9 (а), где приведена зависимость продольных деформаций от времени (ось слева) и действующего осевого давления на образце (ось справа). Для сравнения на рисунке 9 (б) представлен график ползучести образца каменной соли с выделенными рамками областями, где происходит затухание ползучести ввиду увеличения поперечного сечения образца.

Как видно из рисунка 9 (а) изменение осевого давления произошло на 24 %, что слабо сказалось на скорости деформирования в отличие от каменной соли, для которой незначительные изменения осевого давления приводят к соответствующему изменению скорости деформирования в гораздо больших пределах.

Данное обстоятельство, как и в случае с определением деформационных характеристик, продиктовано невозможностью залечивать микротрещины образцов бишофита при деформировании даже при незначительном силовом воздействии.



(a)



(б)

Рисунок 9 – Графики зависимости относительных продольных деформаций от времени (ось слева) и действующего осевого давления на образец горной породы (ось справа): а – образец бишофита, б – образец каменной соли

Для наглядного математического описания свойств бишофита, также как и в одноосном напряженном состоянии, была использована феноменологическая реологическая модель процессов ползучести в таких образцах, представляющие собой суммы математических выражений, описывающих упругое деформирование, затухающую, установившуюся и прогрессирующую ползучести.

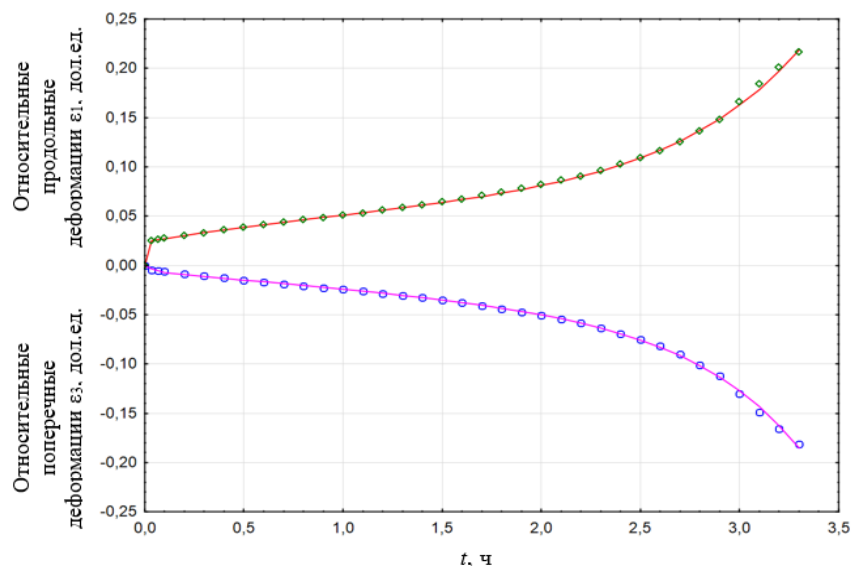


Рисунок 10 – Экспериментальные кривые ползучести образца бишофита №8-1-2: фигурные точки – экспериментальные данные; сплошные линии – результат аппроксимации по формуле (1)

На графиках фигурными точками обозначены – экспериментальные данные, а сплошными линиями – результат аппроксимации по формуле 1.

Формула 1 хорошо описывает деформирование образца на всех ступенях нагружения, что видно на рисунке 10, на котором представлен образец бишофита испытанный при разности главных напряжений 14 МПа.

Необходимо отметить, что по всем испытанным образцам бишофита значения параметров упругости, параметров вязкости и постоянной времени уменьшаются с увеличением разности главных напряжений.

Для того чтобы наглядно показать, как деформировались образцы бишофита и образцы каменной соли под нагрузкой, полученные результаты нормировались к их максимальным значениям. Ниже на рисунке 11 приведены нормированные графики зависимостей деформаций от времени для образца бишофита и каменной соли при одинаковой разности главных напряжений, равной 11 МПа.

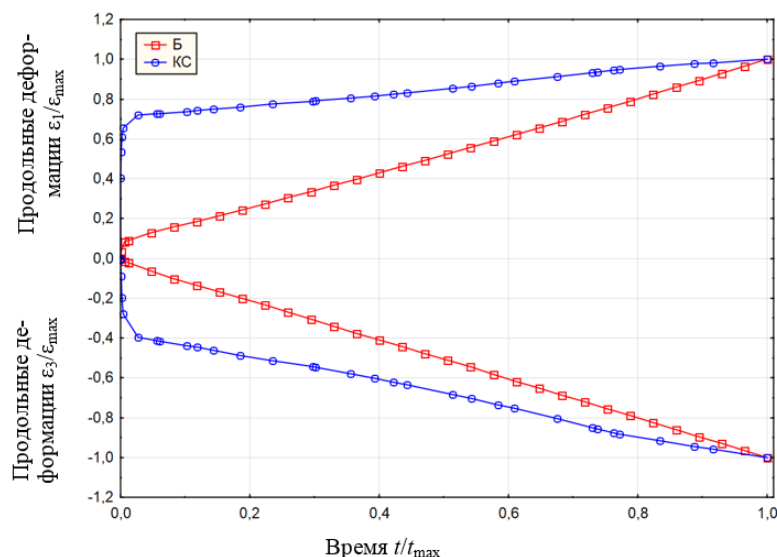


Рисунок 11 – Нормированные кривые ступенчатого нагружения образца бишофита №8-5-1 (Б) и каменной соли №92-4 (КС) $\Delta\sigma = 11$ МПа

Как видно из рисунка 11, ползучесть у образца бишофита начинает проявляться на более низком уровне нагрузок при значении относительных деформаций выше 0,034, а у испытанных образцов каменной соли выше 0,056. Это говорит о том, что даже при незначительном механическом воздействии образцы бишофита проявляют свои ярко выраженные реологические свойства.

Представленные реологические кривые были получены для нескольких значений разности главных напряжений. На практике возникает необходимость получения аналогичных кривых при произвольных значениях разностей главных напряжений, находящихся в диапазоне между их минимальными и максимальными значениями. Непосредственная интерполяция по формуле (1) с помощью стандартных алгоритмов, таких, как алгоритмы Левенберга-Марквардта, Ньютона и других, производящих подбор по методу наименьших квадратов, не дает желаемого результата ввиду большого количества искомых коэффициентов и больших диапазонов изменения параметров этой зависимости. Поэтому были разработаны алгоритм и программа для ЭВМ получения искомых кривых для любой заданной разности главных напряжений. Все выше сказанное по пятой главе подтверждает *четвертое научное положение*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основании выполненных автором теоретических и

экспериментальных исследований содержится решение актуальной научной задачи определения прочностных, деформационных и реологических свойств бишофитовой породы при одноосном и трехосном нагружении, что имеет существенное значение для проектирования, строительства и эксплуатации подземных сооружений в соляных отложениях.

Основные научные результаты работы и выводы, полученные лично автором, заключаются в следующем.

1. На основе проведенных экспериментов по определению деформационных свойств бишофитовой породы впервые установлено, что при циклическом испытании с возрастающей максимальной нагрузкой в каждом цикле на участке разгрузки образца бишофитовой породы продольные деформации не уменьшаются, а, напротив, увеличиваются из-за отчетливого проявления реологических свойств, ввиду чего стандартные методы определения упругих свойств по деформационным характеристикам в случае с бишофитовой породой неприменимы, и модуль упругости, а так-же коэффициент Пуассона следует определять на участках деформационных кривых, соответствующих возрастанию нагрузки.

2. Установлено, что значения пределов прочности бишофита меньше пределов прочности образцов каменной соли не менее, чем в два раза при одинаковых значениях бокового давления. Сцепление бишофитовой породы меньше, чем у каменной соли, в три раза, угол внутреннего трения бишофитовой породы схож с углом внутреннего трения каменной соли.

3. Реологические свойства бишофитовой породы в режиме одноосного ступенчатого нагружения проявляются при абсолютных напряжениях выше 0,5 МПа, а для испытанных образцов каменной соли выше 5 МПа, при этом для нормированных по максимуму на каждой ступени величин деформации и времени ползучести у бишофита проявляется при относительных деформациях выше 0,0013 и напряжениях выше 0,19, а у каменной соли – выше 0,11 и 0,43 соответственно.

4. В трехосном напряженном состоянии ползучесть образцов бишофитовой породы при разности главных напряжений $\Delta\sigma$ менее 2 МПа не проявляется, в диапазоне от 2 до 5 МПа проявляется установившаяся ползучесть, а при $\Delta\sigma$ более 8 МПа проявляется прогрессирующая ползучесть, при этом падение осевого давления до 24 % не оказывает существенного влияния на скорость ползучести бишофитовой породы во время проведения реологических

испытаний в отличие от каменной соли, для которой незначительные его вариации приводят к соответствующему изменению скорости деформирования в гораздо больших пределах.

5. Получены реологические кривые деформирования образцов бишофитовой породы и каменной соли при одноосном ступенчатом нагружении и в трехосном напряженном состоянии. Обоснована феноменологическая модель, удовлетворительно описывающая деформации ползучести во времени в зависимости от приложенного осевого напряжения. Модель позволяет учитывать упругие деформации, а также затухающую, установившуюся и прогрессирующую ползучести. Показано, что с увеличением напряжения параметры упругости модели и параметры вязкости модели уменьшаются, что описывает последовательный переход бишофита от упругой стадии к затухающей, установившейся и прогрессирующей ползучести.

6. Разработана «Программа для расчета и построения кривых ползучести горных пород при заданном напряжении В-Среер, версия 1.0», защищенная Свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667656 в реестре 23 сентября 2022 г., переданная в ООО «Газпром геотехнологии» для практического использования.

7. Как практический выход диссертации разработан интернет ресурс – <https://data.mendeley.com/datasets/kvst6h4zv8/1>, на котором в свободном доступе представлены сравнительные данные по механическим испытаниям в трехосном напряженном состоянии образцов бишофитовой породы и каменной соли, которые могут быть использованы для дальнейших исследований другими учеными.

Основные положения диссертации изложены в следующих опубликованных работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ и в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science:

1. **Осипов Ю.В.,** Кошелев А.Е. Построение паспортов прочности соляных горных пород с использованием графической среды Corel Draw // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 7. – С. 393-396.

2. **Осипов Ю.В.,** Кошелев А.Е. Современные способы определения деформационных свойств горных пород // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 11. – С. 68-75. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-68-75.

3. **Osipov Yu.V.**, Koshelev A.E., Voznesenskii A.S. Experimental studies of the bischofite deformation properties // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal) – 2020. – № 10. P. 5-15. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-5-15.

4. **Osipov Yu.V.**, Voznesenskii A.S. Investigation of the rheological properties of rocks in experiments on stepwise loading of cylindrical samples // Journal of applied mechanics and technical physics. – 2022. – Vol. 63. – №2. – pp. 347-354. DOI: 10.1134/S0021894422020195.

5. **Osipov Yu.V.**, Voznesensky A.S. Determination of rheological properties of bischofite from triaxial tests // Journal of Mining Science. – 2022. – Vol. 58. – №6. – pp. 886-895. DOI: 10.1134/S1062739122060023.

В прочих изданиях:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667656 «Программа для расчета и построения кривых ползучести горных пород при заданном напряжении В-Среер, версия 1.0» / **Осипов Ю.В.**, Вознесенский А.С. // Правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». – № 2022667656. Заявл. 06.09.2022. Оpubл. 23.09.2022.

<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49775092>.

7. **Osipov, Yuxhanna** (2022), “Experimental creep curves of bischofite rock in a complex stressed state”, Mendeley Data, V1. DOI: 10.17632/kvst6h4zv8.1. Доступ: <https://data.mendeley.com/datasets/kvst6h4zv8>.

8. **Осипов Ю.В.** Реологические свойства бишофита в режиме одноосного ступенчатого нагружения // 76-я международная молодежная научная конференция «Нефть и газ-2022». Сборник тезисов. Секция 1. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2022. – С.48-49.

9. **Осипов Ю.В.**, Кошелев А.Е. Экспериментальные исследования физико-механических свойств бишофита и соляных пород его содержащих // XII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика). Сборник тезисов. Секция «Проектирование, сооружение и эксплуатация систем

транспорта и хранения углеводородов». – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2017. – С.151.

10. **Осипов Ю.В.** Экспериментальное определение физико-механических свойств бишофита // 74-я международная молодежная научная конференция «Нефть и газ-2020». Сборник тезисов. Секция 1. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2020. – С.79-80.