

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологиче-
ский университет «МИСИС»**

На правах рукописи

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»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Вознесенский Александр Сергеевич

Москва – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Анализ современного состояния в области экспериментального изучения процессов деформирования и разрушения соляных горных пород и постановка задачи исследования	11
1.1 Общая характеристика свойств, геологических особенностей залегания и добычи бишофита.....	11
1.2 Проблемы, связанные с наличием бишофитовых отложений при строительстве подземного хранилища газа.....	13
1.3 Свойства солей, учитываемые при проектировании подземных хранилищ газа в соляных отложениях, а также других горных предприятий.....	15
1.3.1 Прочностные свойства горных пород.....	16
1.3.2 Деформационные свойства соляных горных пород, используемые при проектировании и строительстве ПХГ и других сооружений	18
1.3.3 Реологические свойства горных пород в режимах одноосного и трехосного нагружений	19
1.4 Математические и феноменологические модели	25
1.5 Постановка цели и задач диссертационной работы	27
2 Образцы пород, измерительное и испытательное оборудование для проведения исследований.....	29
2.1 Изготовление образцов бишофитовой породы	29
2.2 Подготовка образцов к проведению испытаний.....	36
2.3 Характеристика испытательного и измерительного оборудования	39
2.4 Подготовка измерительного оборудования к проведению испытаний.	48
2.5 Выводы по главе 2.....	54

3	Экспериментальное определение прочностных и деформационных свойств образцов бишофитовой породы.....	55
3.1	Общая характеристика образцов, используемых при испытаниях.....	55
3.2	Определение прочностных свойств бишофитовой породы в одноосном режиме нагружения	55
3.2.1	Определение предела прочности при одноосном сжатии	55
3.2.2	Определение предела прочности при одноосном растяжении	58
3.3	Определение деформационных характеристик бишофитовой породы в одноосном режиме нагружения	59
3.3.1	Методика проведения испытаний	60
3.3.2	Результаты испытания бишофитовой породы и сравнение с каменной солью.....	60
3.3.3	Анализ результатов.....	62
3.4	Определение прочностных свойств бишофитовой породы в сложном напряженном состоянии	67
3.4.1	Методика проведения испытаний	68
3.4.2	Обработка полученных экспериментальных данных и построение паспорта прочности бишофитовой породы	70
	Выводы по главе 3.....	82
4	Экспериментальное определение реологических свойств бишофитовой породы в режиме одноосного ступенчатого нагружения	84
4.1	Образцы для проведения испытаний	84
4.2	Методика проведения испытаний	85
4.2	Результаты.....	85
4.3	Анализ результатов	88
4.3.1	Анализ результатов испытаний образцов бишофитовой породы...	88

4.3.2 Построение феноменологических моделей и определение их параметров для образцов бишофитовой породы	89
4.3.3 Анализ результатов испытаний образца каменной соли	96
4.4 Сравнение полученных результатов испытаний образцов бишофитовой породы и каменной соли.....	100
Выводы по главе 4.....	101
5 Экспериментальное определение реологических свойств бишофитовой породы в трехосном напряженном состоянии	103
5.1 Образцы и методика испытаний.....	103
5.1.1 Образцы для проведения испытаний	103
5.1.2 Методика проведения испытаний	104
5.2 Результаты.....	105
5.3 Анализ результатов	108
5.3.1 Общие особенности	108
5.3.2 Построение феноменологических моделей ползучести и определение их параметров для образцов бишофитовой породы и каменной соли	111
5.3.3 Сравнение полученных результатов испытаний образцов бишофитовой породы и каменной соли	115
5.4 Интерполяция реологических кривых ползучести бишофитовой породы для произвольных разностей главных напряжений	116
Выводы по главе 5.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	125
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	140

ВВЕДЕНИЕ

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 нагрузениях».

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 пара-

метры 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.

1 Анализ современного состояния в области экспериментального изучения процессов деформирования и разрушения соляных горных пород и постановка задачи исследования

1.1 Общая характеристика свойств, геологических особенностей залегания и добычи бишофита

Впервые бишофит был обнаружен немецким химиком и геологом Карлом Оксениусом в соляных месторождениях Германии в парагенезисе с галитом, карналлитом, кизеритом, лангбейнитом и другими калийно-магниевыми солями. В честь немецкого химика и геолога Карла Густава Бишофа этот минерал был назван бишофитом. В России установлено региональное распространение бишофитовых пород на территориях Саратовской, Волгоградской, Астраханской областей. Глубина залегания здесь изменяется от 900 до 1900 м. Наиболее мощные скопления бишофита среди ископаемых солей в настоящее время известны на территории Северного Прикаспия [1], где прослежены залежи бишофитовых пластов мощностью от 7 до 279 м [2]. Пластовые залежи бишофита установлены преимущественно в крупных соленосных бассейнах, характеризующихся огромной площадью распространения и значительной мощностью соляных отложений, изменяющейся от сотен метров до нескольких километров. Горизонты и пачки солей с бишофитовыми образованиями располагаются в основном в верхней части соляных толщ галогенных формаций.

Бишофит – это минерал, химическая формула которого $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ [3]. Он является минералом конечной стадии осаждения (образования) солей при испарении вод Мирового океана. Плотность бишофита – 1,54 – 1,56 г/см³. Твердость по шкале Мооса – 1 – 2 ед. Температура плавления 106–110 °С. В высокой степени гигроскопичен, при нагревании теряет молекулы воды, т.е. идет процесс обезвоживания. Прочность бишофита значительно ниже, чем у галита (каменная соль). Он легко деформируется при минимальных нагрузках. Ползучесть бишофита выше, чем у каменной соли.

Многие десятилетия бишофит носил статус редкого минерала. Удивительным казалось то, что отдельные пласты и прослои сложены почти мономинеральной бишофитовой породой с содержанием бишофита 95–98% [2].

В середине 60-х годов Н. П. Гребенников занимался решением одной из важнейших задач – поиском способа подъема керна при перебуре интервалов сверхгигроскопичной бишофитовой породы, что не удавалось осуществить ранее кроме редких удачных попыток получения отдельных образцов. Его усилия увенчались успехом, и в 1966 г. при бурении скважины №1 Суводской впервые было отобрано непрерывно 18 м искомой породы [4].

Галогенные образования, в том числе и бишофитовые залежи, располагаются в Поволжском бишофитоносном бассейне на значительных глубинах. Первооткрывателем бассейна по праву считается Ермаков В. А. В середине 70-х годов, интерпретируя каротажные диаграммы по скважинам, он не только обосновал имевшиеся уже на то время предположения о наличии бишофитовых залежей в разрезе галогенной толщи Приволжской моноклинали, но и проследил их площадное развитие, тем самым доказав потенциальное промышленное значение открытия [5].

Планомерное изучение бишофитоносности Приволжской моноклинали начинается с конца 80-х годов работами Волгоградской геологоразведочной экспедиции ПГО «Нижеволжскгеология». Проектом «Поиски калийных и магниевых солей на Приволжской моноклинали», составленным в 1978 году (Свидзинский С.А., Аношин Л.В.), предусматривалось бурение трех опорных скважин с непременно сплошным отбором керна по галогенным образованиям. В итоге:

– в 1979 г. пройдена скважина 1 Краснокутская. Скважина перебурила галогенную толщу кунгура почти полностью, до третьей снизу приволжской ритмопачки. Впервые была получена непосредственная литологическая, химическая, минералого-петрографическая и геохимическая характеристика этой толщи. Кроме того, в разрезе погожской ритмопачки вскрыт 20-метровый

пласт калийно-магниевых солей, включающий 13-метровый слой чистой бишофитовой породы [6];

– в 1984-1986г.г. осуществлено бурение двух скважин (1п, 2п) на Наримановской площади. При определении здесь запасов сырья поднятый по этим скважинам керн в интервале продуктивной толщи позволил использовать каротажные данные по 10-ти пробуренным ранее скважинам нефтяников и представить (С.А. Свидзинский, Д.И. Цимберг, В.П. Бордюгов, О.Д. Свидзинская, В.А. Ермаков) на ГКЗ СССР Наримановское месторождение бишофита.

Бишофит как породообразующий минерал, слагающий в ряде случаев пласты толщиной в несколько десятков метров, обнаружен в солевых отложениях при бурении скважин на площадях Прикаспийской и Днепровско-Донецкой впадин. Такие пласты залегают в соляных массивах на глубинах до 3000 м и более [7].

1.2 Проблемы, связанные с наличием бишофитовых отложений при строительстве подземного хранилища газа

Существует ряд проблем, возникающих при строительстве подземного хранилища газа. Эти проблемы связаны с наличием в разрезе бишофитовых отложений, являющихся причиной образования больших каверн и потерей устойчивости обсадных колонн.

Бишофит обладает высокой гигроскопичностью, т. е. способен быстро растворяться в водной фазе бурового раствора, а также обладает низкими прочностными свойствами. В связи с этим отложения бишофита являются причиной осложнений при строительстве скважин. Самым распространенным видом осложнения является сужение ствола скважины, вызванное большой склонностью бишофита к ползучести. Такое осложнение приводит к просадке, заклиниванию и прихватам инструмента.

В США с 1960 г. было затрачено 170 млн. долларов на перебуривание скважин в солях, где были обнаружены повреждения колонн [8]. Как показывает опыт, нарушения колонн приурочены, в основном, к интервалам каверн,

которые имеют особенно большие размеры (как по высоте, так и по диаметру) в отложениях бишофита.

Повреждения обсадных колонн в хемогенных отложениях связаны со специфическими свойствами солей: высокой пластичностью и способностью течь под действием горного давления, высокой растворимостью и, как следствие, кавернообразованием. И если в процессе бурения склонность солей течь в сторону наименьшего давления, т.е. в сторону ствола скважины, может быть скомпенсирована плотностью бурового раствора, то в статических условиях крепи это свойство проявляется в полной мере.

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.

Стоит особо отметить, что исследования, посвящённые определению механических свойств бишофитовой породы, очень немногочисленны. В открытых источниках их практически невозможно найти. Некоторые свойства, но далеко не все, можно найти в горной энциклопедии [9]:

- твердость 1–2;
- плотность 1,6 г/см³;
- спайность – нет;
- излом раковистый до неровного;
- уже при минимальных нагрузках легко деформируется;
- очень легко растворяется в воде и в спирте;
- на вкус жгучий, горький.

Недостаточность изученности механических свойств бишофитовой породы определяет актуальность данного исследования.

1.3 Свойства солей, учитываемые при проектировании подземных хранилищ газа в соляных отложениях, а также других горных предприятий

При определении пригодности месторождения каменной соли для строительства подземных хранилищ газа отдельное место занимают исследования по определению механических свойств каменной соли, поскольку они существенным образом влияют на размеры хранилища и его основные эксплуатационные характеристики.

В связи с тем, что происхождение каменной соли даже в пределах одного месторождения может быть различным, то соответственно и механические свойства каменной соли значительно отличаются. Исследованию разного рода формирований каменной соли посвящены работы [10, 11, 12, 13].

Из прочностных показателей особое место занимает предел прочности при одноосном сжатии σ_c , который является наиболее распространенной оценкой механических свойств горных пород. В настоящее время существует большое количество результатов исследований соляных горных пород по определению предела прочности при одноосном сжатии [14, 15, 16, 17] и другие ученые. Для каменной соли предел прочности при одноосном сжатии изменяется в пределах от 5 до 40 МПа. Деформационные характеристики такие как, например, модуль деформации E_d могут отличаться в два-три раза. Такое отличие связано, прежде всего, со структурно-текстурными особенностями каменной соли.

Решение разного рода горнотехнических задач связано с исследованием деформируемости горных пород в массиве, а также с определением и использованием их деформационных характеристик. Изученные общие закономерности деформирования горных пород дают возможность сказать, что горные породы обладают упругими, вязкими и пластическими свойствами [18].

Изучению механики горных пород, массивов горных пород, разрушению и теориям прочности посвятили свои работы Барях А.А [19], Гриффитс А.А. [20], Ржевский В.В. [21], Баклашов И.В. [22, 23, 24], Руппенейт К.В. [25], Шемякин Е.И. [26], Одинцев В.Н. [27, 28], Иофис М.А. [29], Картозия Б.А. [30, 17], Дамаскинская Е.Е. [31], Козырев А.А. [32], Ершов Л.В. [33], Макаров А.Б. [34], Ставрогин А.Н. [35], Чирков С.Е. [36], Протосеня А.Г. [29], Черепанов Г.В. [37], Фисенко Г.Л. [38] и другие ученые [39].

1.3.1 Прочностные свойства горных пород

Сопротивление горных пород сжатию, растяжению и сдвигу являются механическими характеристиками, отражающими прочность пород при простых напряженных состояниях. Напряженное состояние в горных породах получается более сложным, что отражается на их прочностных и деформационных характеристиках.

Из большого количества теорий прочности в механике горных пород самое большое распространение получила теория прочности О. Мора [40]. Согласно теории Мора, ответственными за разрушение являются касательные напряжения, а само разрушение носит характер сдвига по площадкам, на которых достигается предельное состояние.

Огибающая кругов Мора должна удовлетворять следующим условиям:

- 1) Огибающая должна быть монотонной кривой, симметричной относительно оси нормальных напряжений σ , замкнутой в области растягивающих напряжений.
- 2) Огибающая пересекает в области растяжения ось нормальных напряжений σ в точке σ_p , $\tau=0$.
- 3) Производная монотонной кривой во всем диапазоне ее существования от σ_p до σ должна быть больше или равна нулю.
- 4) Радиус кривизны огибающей в точке пересечения оси σ равен нулю.

Оксенкруг Е.С. и Карташов Ю.М. в своей работе [41] занимались изучением предела прочности при одноосном сжатии соляных пород в лабораторных условиях. Авторами отмечается, что с целью повышения точности испытаний соляных пород за счет получения прочностных показателей пород, близких к прочности в массиве, выдержку образцов, предварительно, производят под нагрузкой 40 – 60 % от предела прочности в течение 230 – 490 ч.

В работе [42] проведены экспериментальные исследования образцов горных пород скважины №44 Половодовского участка Верхнекамского месторождения при одноосном сжатии, получены физико-механические показатели, включающие предел прочности, предел длительной прочности, разрушающая деформация, упругая деформация, модуль упругости, модуль спада.

В работе [43] представлен подход для связи прочностных данных по образцам горных пород различного размера с данными, по которым определены полукруги Мора для областей, относящихся к одноосному сжатию и растяжению.

Авторами [44] рассмотрены актуальные методы испытаний горных пород на сжатие в России и за рубежом. Получена зависимость, позволяющая учитывать комплексное влияние отличия диаметра образца и отношения его высоты к диаметру от эталонных параметров.

В работе [45] авторами представлены результаты экспериментальных исследований образцов каменной соли с предварительным гидростатическим сжатием. Установлено, что прочность образцов, по сравнению с испытаниями по ГОСТ 21153.8-88, возрастает на 10 – 15 %.

Учеными в [46] исследовалось влияние температуры и скорости нагружения на образцы каменной соли на прочность при растяжении. Установлено, что с увеличением температуры прочность образцов каменной соли уменьшается, что вызвано ростом дислокаций в образцах.

1.3.2 Деформационные свойства соляных горных пород, используемые при проектировании и строительстве ПХГ и других сооружений

Деформационными характеристиками горных пород в зависимостях «напряжение-деформация» в пределах упругого линейного деформирования являются модуль упругости E_y и коэффициент Пуассона μ . Когда происходит переход деформации из упругой области в неупругую область деформирования принято определять модуль деформации E_d и коэффициент поперечной деформации μ .

Изучением деформационных характеристик соляных пород занимались такие ученые как Протодьяконов М.М., Габдрахимов И.Х., Чирков С.Е., Воронцов Г.П., Менцель В., Шрайнер В., Шаманский Г.П., Паньков И.Л. [14, 47, 48, 49, 50].

Вышеупомянутые деформационные характеристики в практике лабораторных исследований горных пород чаще всего определяют следующими тремя способами [51]: 1) измерение продольных и поперечных деформаций при сжатии индикаторами, как правило, часового типа; 2) измерение продольных и поперечных деформаций при сжатии при помощи электроизмерительных схем с использованием проволочных датчиков, тензорезисторов, путем аппликации их на боковую поверхность образца; 3) по скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в исследуемых горных породах, чаще всего, при помощи ультразвуковых датчиков.

В работе [52] представлены экспериментальные исследования каменной соли. Данные исследования проводились для решения практических задач по проектированию, строительству и эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ), создаваемых в каменной соли. Результаты исследований показали, что при предварительном гидростатическом сжатии и последующем испытании модули деформации и упругости, коэффициент Пуассона, а также прочность образцов значительно возрастает, по сравнению со стандартными методами исследований.

Автор [53] в лабораторных условиях экспериментально определял модуль деформации каменной соли в сложном напряженном состоянии с предварительным гидростатическим сжатием. Результаты исследований показали, что модуль деформации в сложном напряженном состоянии в среднем в 3,8 раза превышает модуль деформации, определенный по стандартной методике.

Ранние исследования, посвященные циклическому нагружению горных пород отражены в работах Бурдине [54], Хаймсона и Кима [55].

Для этих пород характерны большие деформации, пластичность, способность залечивать трещины и другие особенности, выделяющие их в особую группу. Изучение их свойств является актуальным и сегодня, о чем свидетельствует ряд последних отечественных [10, 11, 12] и зарубежных [13, 14, 15] публикаций.

1.3.3 Реологические свойства горных пород в режимах одноосного и трехосного нагружений

Реологические свойства горных пород – совокупность свойств, определяющих способность горных пород изменять во времени напряжённо-деформированное состояние в поле действия механических сил. К основным реологическим свойствам относятся: предел длительной прочности, ползучесть, релаксация напряжений.

Соляные породы обладают ярко выраженными реологическими свойствами, которые проявляются в способности деформироваться во времени под действием постоянных усилий (ползучесть), в снижении напряжения при постоянной деформации (релаксация) и в изменении прочности при длительном действии нагрузки (длительная прочность).

Реологическим испытаниям по изучению свойств соляных пород посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ.

Одними из первых исследовали ползучесть образцов сильвинита и карналлита Г. Гринвальд и Г. Ховард. Образцы имели форму призм с высотой,

меньше чем ширина основания. Установлено, что скорость деформации ползучести убывает со временем и зависит от химического состава породы.

Ф. Шуппе [56] исследовал ползучесть соленосных пород в лабораторных и натуральных условиях и отметил, что соляные породы месторождений Германии подвержены течению со скоростью 0,01 – 0,1 мм/сут. В экспериментах установлен S-образный вид кривых ползучести при больших уровнях нагружения.

К.–Г. Хёфер и П. Кноль [57] изучали ползучесть образцов карналлита. Отмечено, что ползучесть карналлита в зависимости от уровня нагружения и температуры протекает либо по логарифмическому, либо по степенному закону. В опытах на одноосное сжатие при боковом давлении выявлена граница перехода от одного закона к другому в зависимости от отношения высоты образца к его диаметру (h/d) при постоянной температуре и влажности.

В лабораториях ВНИМИ и ВНИИПромгаза Е.М. Шафаренко с соавторами были проведены исследования ползучести цилиндрических образцов каменной соли Соль-Илецкого месторождения в условиях одноосного сжатия и сложного напряженного состояния ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) [58].

Е.С. Оксенкругом совместно с Ю.М. Карташовым на установке УДП ВНИМИ были проведены исследования реологических свойств каменной соли также в условиях сложного напряженного состояния [59].

Авторами [60] были проведены исследования зависимостей акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли от напряжений и температуры. Как отмечают авторы с увеличением напряжений переход каменной соли в стадию прогрессирующей ползучести происходит при меньших температурах. Отмечены преимущества использования акустико-эмиссионных измерений для прогноза разрушения каменной соли вследствие прогрессирующей ползучести.

Кравченко О.С. и Филимонов Ю.Л. [61] занимались изучением механических свойств каменной соли при различных повышенных температурах, где

экспериментально установлено, что с увеличением температуры с 20 до 70 °С скорость деформирования возрастает в 3 – 5 раз.

Свойства геологических материалов в значительной степени зависят от максимального приложенного напряжения [62, 63, 64, 65, 66], амплитуды [67], частоты нагрузки [68] и ее формы [69, 70].

Проявление такого процесса, как ползучесть горных пород, при проектировании и строительстве подземных хранилищ газа в соляных кавернах, а также при бурении [71] может стать причиной появления серьезных проблем. Авторами [72] были проведены анализы инцидентов со сминанием обсадных колонн на двух площадях месторождения в Восточной Сибири. Полученные результаты по исследованию реологических свойств (ползучести) каменных солей позволили рассчитать долговечность крепи скважины сроком службы на 30 лет.

Экспериментальные определения реологических свойств галогенных пород в лабораторных условиях являются весьма трудоемкой и сложной задачей ввиду их неоднородности, трудности изготовления образцов для исследования и непосредственно самого исследования. Определение реологических свойств занимает не менее 300 часов и более. В работе [73] приведены результаты экспериментальных исследований механических свойств каменной соли при трехосной циклической нагрузке. Титов Б.В. [74] занимался изучением предела прочности соляных пород на сжатие при различных напряженных состояниях, а также определял их численные значения для соляных пород Верхнекамского калийного месторождения. Автором установлено, что при длительном и быстром режимах приложения нагрузки в одноосном и сложном напряженном состояниях процессы накопления повреждений в соляной породе качественно аналогичны. Значимый вклад в изучение механики деформируемого твердого тела внес Работнов Ю.Н. [75], который в своих работах объединил элементы сопротивления материалов, теории упругости, теории пластичности, теории ползучести, вязко-упругости и механики разрушения.

Назаров Л.А. и Назарова Л.А. занимались изучением реологических свойств горных пород с использованием вязкоупругой модели [76, 77, 78].

Опыты на ползучесть являются эталонными методами реологических испытаний, объективно отражающими влияние временного фактора. Важным моментом в экспериментах на ползучесть является планирование режимов испытаний, что предусматривает задание напряжений и длительностей их приложения. Полученные реологические кривые и параметры модели должны давать возможность точного прогноза поведения горной породы в течение всего срока службы подземного объекта.

На рисунке 1.1 представлен набор кривых ползучести при напряжениях $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4 > \sigma_5 > \sigma_6 > \sigma^\infty$. Момент разрушения образца в процессе ползучести определяется для каждого напряжения и перестраивается в координатах $(\sigma; t)$. Отмечается также точка σ_c (при $t=0$) и строится кривая длительной прочности. Она асимптотически стремится к пределу длительной прочности [79].

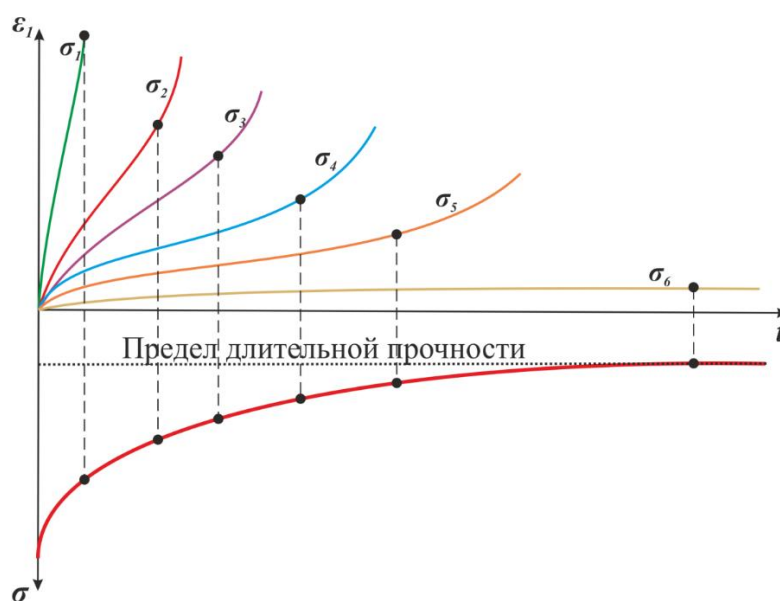


Рисунок 1.1 – Деформирование горных пород при длительном воздействии нагрузки

Все материалы в меньшей или большей степени подвержены процессу ползучести, но среди горных пород больше всего – это галогенные горные породы, к которым относится бишофит. Медицинские и химические свойства

бишофита изучены достаточно хорошо [80, 81, 82]. В то же время публикации, посвященные исследованию его механических свойств, практически отсутствуют.

Бишофит как конструктивный элемент встречается в массиве пород при бурении скважин, при строительстве и эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ) [83, 84, 85, 86], сжатого воздуха [87] и других газов [88]. Это свидетельствует о необходимости изучения механических свойств бишофитовой породы, таких, как прочностные, деформационные и реологические свойства. Знание этих свойств необходимо для моделирования возникающих явлений при помощи упруго-вязко-пластической модели среды при проектировании указанных объектов.

Поскольку бишофитовая порода относится к галогенным породам, имеет смысл рассмотреть свойства бишофитовой породы в сравнении с другими породами этого класса. К ним относятся: каменная соль, карналлит, сильвинит и другие породы. Каменная соль хорошо изучена, результаты исследований публикуются и в последнее время такими учеными, как Mansouri H et al [89], Costa P.V.M. et al [90], Shao H. et al [91], Карташов Ю.М. et al [92], Агеенко В.А. [93, 94] и другими [95]. Отдельное внимание изучению механических свойств карналлита и сильвинита уделено такими авторами как Байков А.С. [96], Аптуков В.Н. [97], Luangthip A. et al [98]. В настоящее время изучению поведения образцов каменной соли под нагрузкой во времени уделено внимание большого числа исследователей [54, 99, 100, 101] и др.

Существует много методов исследования реологических свойств горных пород и материалов, которые можно объединить в две группы: прямые (классические) методы и ускоренные или косвенные методы, к которым относится метод ступенчатого нагружения.

Сущность прямого метода заключается в том, что на образец подается давление, которое на протяжении всего времени эксперимента поддерживается постоянным. Одновременно с этим осуществляется непрерывная запись деформаций образца до его разрушения. Данный метод

является наиболее достоверным методом экспериментального определения реологических свойств. Тем не менее, существует ряд трудностей, с которыми сопряжен прямой метод: применение сложного оборудования, значительная длительность экспериментов, поддержание постоянного давления на образце на протяжении всего времени проведения испытания, которое изменяется с падением или ростом температуры, влажности [102]. Прямой метод даже в одноосном напряженном состоянии крайне трудоёмок, требует сложного оборудования и большой продолжительности опыта. Исследования, посвященные реологическим испытаниям прямым методом отражены в работах [103, 104, 105, 106, 107].

В связи с этим были разработаны косвенные, ускоренные методы определения реологических свойств горных пород. В отличие от прямых, данные методы позволили сократить длительность испытаний и снизить их трудоемкость. Г.Н. Кузнецов [108] впервые предложил метод, при помощи которого возможно получение всего семейства кривых ползучести по испытанию одного образца. Данный метод основан на ступенчатом приложении нагрузки к образцу в течение заданного времени с последующим увеличением нагрузки на следующей ступени.

Тавостин М.Н. в своей работе [109] занимался экспериментальными исследованиями реологических свойств каменной соли при различных видах нагружения в лабораторных условиях, которые отражают напряженное состояние в приконтурной зоне подземного резервуара на глубинах от 700 м до 2000 м, для оценки закономерностей длительного деформирования каменной соли.

Карташов Ю.М. и Ильинов М.Д. в своей работе [110] занимались изучением ускоренного метода определения реологических свойств горных пород, где при ступенчатом нагружении образца получено семейство кривых ползучести. Сопоставление кривых показало удовлетворительную сходимость результатов экспериментов различными методами.

Влияние вида напряженного состояния на реологические свойства каменной соли исследованы в работе [111].

Реологическим испытаниям в режиме одноосного ступенчатого нагружения каменной соли посвящены работы ряда зарубежных авторов [112, 113, 114].

Многие авторы полученные ими кривые ползучести интерпретировали с помощью феноменологических моделей, в основе которых лежали упругий элемент (элемент Гука), пластический (элемент Сен-Венана) и вязкий элементы (элемент Ньютона). Изучением структурных реологических моделей горных пород занимались Оловянный А.Г. [115, 116], Карташов Ю.М. [117], Svetlana Lerche [118], Liu J. [119] и др.

С точки зрения исследования механических свойств бишофитовая порода является практически неизученным минералом. Поэтому возникает задача исследования его реологических свойств и создания моделей, которые описывали бы его поведение при нагружении и деформировании. Особое место здесь занимают феноменологические модели и соответствующие математические выражения, в которых коэффициенты отражают определенные физические свойства, в частности, упругость и вязкость.

1.4 Математические и феноменологические модели

Каменная соль, как среда для подземных хранилищ, выбрана в связи с тем, что она уже при небольших действующих напряжениях проявляет реологические свойства, т. е. существует возможность самозалечивания трещин, таким образом, исключается возможность миграции хранимого продукта.

Основные подходы к оценке напряженно-деформированного состояния породного, в том числе и соляного, массива объединяют в такие группы, как методы натурных, лабораторных и теоретических (аналитических и численных) исследований. Результаты экспериментальных исследований позволяют установить общие закономерности деформирования горных пород, однако

ограничены областью их практического использования, как правило, конкретными участками проведения измерений. Теоретический анализ (математическое моделирование) проявлений горного давления обладает большей общностью и открывает перспективу прогноза устойчивости горных выработок [120] и различных конструктивных элементов системы разработки.

Под математической моделью деформирования и разрушения горных пород понимают зависимости между тензорами напряжений, деформаций и временем, т.е. уравнения состояния, а также критерии разрушения пород.

Широкое распространение для расчетов устойчивости выработок-емкостей получили две математические модели: Е.М. Шафаренко и зарубежная вязко-пластическая модель Drucker-Prager.

Математическая модель поведения каменной соли Е.М. Шафаренко имеет следующий вид:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_i^\infty} = \frac{c}{c-1} \cdot \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i^\infty} \left[1 - \frac{1}{c} \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i^\infty} \right)^{c-1} \left(1 - \exp(-\alpha t^\delta) \right) \right] \quad (1.1)$$

$$\sigma_V = K \varepsilon_V - \frac{\sigma_i^n}{m} \left(1 - \exp(-\rho t^\beta) \right) \quad (1.2)$$

$$c = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_i^\infty}{G \varepsilon_i^\infty}} \quad (1.3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.4)$$

$$K = \frac{E}{1 - 2\nu} \quad (1.5)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1.6)$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (1.7)$$

где σ_i – интенсивность касательных напряжений, σ_i^∞ – интенсивность касательных напряжений, соответствующая пределу длительной прочности при заданной сумме главных напряжений σ_v , ε_i – интенсивность деформаций сдвига, ε_i^∞ – интенсивность деформаций сдвига при $\sigma_i = \sigma_i^\infty$ и бесконечно большом значении времени, σ_v – сумма главных напряжений, ε_v – объемная деформация, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации, K – модуль объемного сжатия, G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, $m, n, \alpha, \beta, \rho, \delta$ – параметры.

Математическая модель Drucker-Prager имеет следующий вид:

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^{cr} = A(\bar{\sigma}^{cr})^n t^m \quad (1.8)$$

где $\dot{\bar{\varepsilon}}^{cr}$ – эквивалентная скорость деформации ползучести;

$\bar{\sigma}^{cr}$ – эквивалентные напряжения ползучести;

t – время действия нагрузки;

A, m, n – задаваемые пользователем параметры закона ползучести.

1.5 Постановка цели и задач диссертационной работы

Все вышеперечисленное поставило перед автором целый ряд задач, которые необходимо выполнить, чтобы корректно провести эксперименты.

Если реологические свойства каменной соли к настоящему времени изучены достаточно хорошо, то данные о реологических свойствах бишофитовой породы, встречающейся в залежах каменной соли в виде пропластков, практически отсутствуют. Бишофит является сверхгигроскопичным минералом, который при малейшем контакте с окружающей средой впитывает в себя влагу

и переходит в текучее состояние. При минимальном механическом воздействии проявляются аномально высокие пластические и реологические свойства бишофита.

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.

Целью работы является определение прочностных, деформационных и реологических свойств бишофитовой породы в условиях одноосного и трехосного напряженных состояний.

Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение сформулированных во введении задач исследования.

2 Образцы пород, измерительное и испытательное оборудование для проведения исследований

В современной практике изучения прочностных и деформационных свойств бишофитовой породы практически, отсутствуют экспериментальные данные, которые необходимы для расчетов устойчивости выработок. Это связано с целым рядом условий, необходимых для изготовления и испытания образцов, начиная уже с выбуривания кернового материала бишофитовой породы из скважины. К тому же даже при минимальном механическом воздействии бишофитовая порода проявляет пластические свойства, а, следовательно, практически невозможно применять существующие методики (ГОСТы) для определения механических свойств.

2.1 Изготовление образцов бишофитовой породы

Изготовление образцов бишофитовой породы сопряжено со многими трудностями. В первую очередь это связано с бурением и транспортировкой. До сравнительно недавнего времени не удавалось пробурить скважину и удачно достать керновый материал. Это связано, во-первых, с тем, что отбор кернового материала из скважины происходил с ненасыщенным рассолом по магнию, т.е. в процессе бурения в пластах залегания бишофита рассол (из NaCl) размывал бишофит. Во-вторых выбуренный материал необходимо на месте, как можно быстрее, изолировать от влияния внешней среды. Одним из наиболее распространенных способов является парафинирование.

Благодаря жесткому контролю над процессом бурения и правильной изоляцией кернового материала удалось транспортировать для дальнейших исследований керновый материал с Волгоградского месторождения, скважин №5т и №8т, в лабораторию.

Бишофитовая порода из скважины №5т для экспериментов извлекалась с глубины 1327,0-1333,8 м, т.е. мощность слоя составила 6,8 метра. Керновый материал располагался в деревянных четырехметровых ящиках. Бишофитовая

порода из скважины №8т извлекалась с глубины 1327,4-1335,0 м, т.е. мощность слоя составила 7,6 м. Керновый материал поступал в запарафинированном виде ввиду его сверхгигроскопичности.

Перед изготовлением образцов проводилась нумерация каждого монолита, детальное геологическое описание, а также фотографирование кернового материала. Нумерация монолитов была следующей А-В, где А – это номер ящика, В – номер монолита в ящике.

По геологическому описанию скважины №5т интересующая глубина для исследования находилась в более широком интервале 1322,0-1340,0 метров. Данный интервал разбит на 6 слоев различной мощности.

Бишофитовая порода представлена двумя слоями:

- слой 1 – бишофит прозрачный, участками розовато-серый, грубокристаллический (раковистый излом), массивный, плотный, слабой крепости, горько-солёный, жирный на ощупь; мощность слоя 4,2 м;
- слой 2 – бишофит розовато -, красновато-серый, полупрозрачный, прозрачный, разнокристаллический, массивный, неяснослоистый, косослоистый, пористый закрытого типа, слабой крепости, горько-солёный, жирный на ощупь; мощность слоя 2,6 м.

Общий вид ящика с керновым материалом представлен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Общий вид ящика с керновым материалом, Волгоградское месторождение, скважина №5т, глубина 1327,0-1333,8 м

Согласно данным организации, занимавшейся бурением, потеря диаметра на первом слое составила до 6,5 см, на втором слое до 7,5 см. Это можно наблюдать на рисунке 2.1, на котором видно, что диаметр выбуренного кернового материала по длине неодинаков и изменяется волнообразно. Этот факт сильно усложнил изготовление образцов.

По геологическому описанию скважины №8т интересующая глубина для исследования находится в более широком интервале 1319,0-1337,0 метров. Данный интервал разбит на 10 слоев различной мощности.

Бишофитовая порода представлена двумя слоями:

- слой 1 – бишофит прозрачный, участками розовато-серый, крупнокристаллический (раковистый излом), массивный, плотный, слабой крепости, горько-солёный, жирный на ощупь; мощность слоя 3,2 м;
- слой 2 – бишофит розовато -, красновато-серый, полупрозрачный, прозрачный, мелкокристаллический, массивный, неяснослоистый, косослоистый, пористый закрытого типа, слабой крепости, горько-солёный, жирный на ощупь; мощность слоя 4,4 м.

Общий вид ящика с керновым материалом без парафина и в парафине представлен на рисунке 2.2.



(а) до парафинирования



(б) после парафинирования

Рисунок 2.2 – Общий вид ящика с керновым материалом до парафинирования (а) и после парафинирования (б), Волгоградское месторождение, скважина №8т, глубина 1327,4-1335,0 м

Согласно данным организации, занимавшейся бурением, потеря диаметра на первом слое составила до 6,5 см, на втором слое потери диаметра незначительны. Это можно наблюдать на рисунке 2.2.

На рисунке 2.3 показаны фотографии наиболее представительных минералов с глубины 1319,0-1337,0 метров.



Рисунок 2.3 – Наиболее представительные минералы с Волгоградского месторождения, скважина №8т, интервал 1319,0-1337,0 метров

После того как весь керновый материал прошел геологическое описание и был сфотографирован, следовало изготовление образцов.

Весь процесс подготовки образцов от кернового материала до готового образца состоит из следующих этапов:

1. Каждый монолит в ящике распределяется на определенный вид испытаний. Затем монолит на отрезном станке торцуется (рисунок 2.4) с двух сторон для дальнейшего вытачивания на токарном станке, т.е. получается заготовка с плоскопараллельными торцами. Параллельность торцов друг относительно друга проверяется угольником. Пример такой заготовки представлен на рисунке 2.5. В связи с высокой гигроскопичностью бишофитовой породы

обычные способы изготовления образцов на камнерезном оборудовании с алмазным инструментом и промывкой водой неприменимы. Использование промывочных жидкостей, не растворяющих бишофитовую породу (керосин, вазелиновое масло), сопряжено с высокой пожароопасностью, сложностью удаления продуктов промывки с поверхности и из пор образца. Однако невысокая прочность бишофитовой породы позволяет избежать ряда этих трудностей. Вследствие чего отпиливание происходило «всухую», без промывочных жидкостей.



Рисунок 2.4 – Подготовка монолита 10-1 к отрезанию на камнерезном оборудовании



Рисунок 2.5 – Пример заготовки из керна материала

В зависимости от вида испытания длина заготовок была различной. Так, для определения предела прочности при одноосном сжатии, определения предела прочности при объемном сжатии и определения деформационных характеристик длина заготовки составляла 80 мм с учетом толщины отрезного диска (3-4 мм). Для проведения реологических испытаний длина заготовок составляла 70 мм, также с учетом толщины режущего диска (3-4 мм).

2. Полученная заготовка помещалась в токарный станок и обтачивалась до необходимого диаметра (рисунок 2.6). Практика изготовления образцов показала, что соляные породы достаточно хорошо обрабатываются обычным металлорежущим инструментом (резцами с победитовыми напайками, сверлами из инструментальной стали, отрезными корундовыми дисками). Но образцы бишофитовой породы даже при небольшом контакте с резцом начинали покрываться маслянистой пленкой, т.е. понемногу растворяться, этот нюанс необходимо учитывать, чтобы можно было изготовить образцы необходимых геометрических размеров. Время изготовления образца на токарном станке составляло не более 10 минут, в противном случае начинался процесс «расплывания» и как следствие мог быть получен образец неправильной формы.



Рисунок 2.6 – Изготовление из заготовки, закрепленной в токарном станке, образца бишофитовой породы

В результате обработки кернового материала на станке получался цилиндрический образец. На рисунке 2.7 показан токарный станок с готовым образцом бишофитовой породы.



Рисунок 2.7 – Общий вид токарного станка с закрепленным в нем образцом бишофитовой породы

3. Изготовленному образцу присваивается номер следующим образом: А-В-С, где А – номер ящика, В – номер монолита в ящике, С – порядковый номер образца, изготовленного из монолита. Осуществлялся замер геометрических параметров, его фотографирование. Затем он обтирался сухой салфеткой. В случае если испытание сразу не проводится, то образец помещался в полиэтиленовый пакет, а затем в эксикатор с безводным хлористым кальцием. Если нет в наличии безводного хлористого кальция, то можно взять обычный, предварительно прокалив его на сковороде. Упаковка образца в полиэтиленовый пакет, помещение его в эксикатор с безводным хлористым кальцием необходимо сделать, чтобы образец не растворялся и сохранил свои параметры. На рисунке 2.8 показан готовый образец бишофитовой породы к проведению испытания.

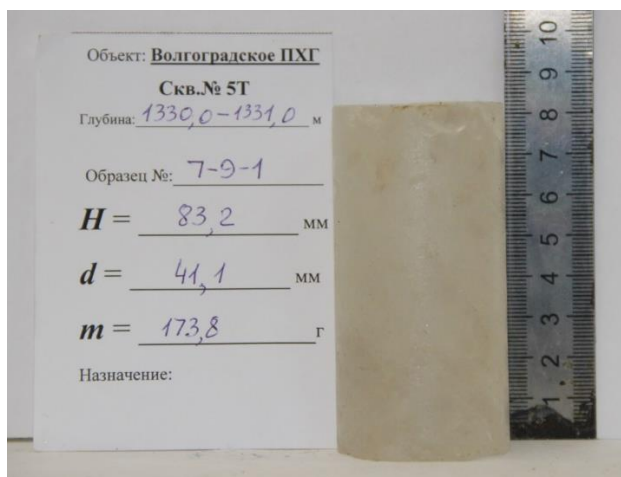


Рисунок 2.8 – Образец бишофитовой породы №7-9-1

Предварительно перед подготовкой всех образцов к проведению испытаний с каждого образца в процессе изготовления отбиралась проба на химический анализ. Химический анализ исследуемых образцов бишофитовой породы 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. Далее в работе для упрощения написания под бишофитом будет подразумеваться бишофитовая порода с указанным выше содержанием галита (NaCl).

2.2 Подготовка образцов к проведению испытаний

После того как образец изготовлен, его необходимо подготовить к проведению эксперимента. Под каждый вид испытания подготовка будет отличаться.

1. Определение предела прочности при одноосном сжатии и определение деформационных характеристик проводилось на одном образце ввиду небольшого их количества. Главной и основной особенностью определения деформационных характеристик у образцов бишофита и пород, его содержащих, как уже упоминалось выше, является крайняя сложность установки измерительного оборудования на образец ввиду его высокой гигроскопичности, т.е. как только образец вынимался из эксикатора, он в течение нескольких минут

покрывается маслянистой пленкой, которая не позволяла устойчиво зафиксировать измерительное оборудование. Это обстоятельство послужило поводом для разработки новой системы фиксации датчиков измерения продольных и поперечных деформаций на образце бишофита, потому как существующие методы измерения деформаций в данном случае абсолютно непригодны. Было испробовано много способов установки датчиков на образец, но все так или иначе начинало «ползти» по образцу, что абсолютно неприемлемо при проведении экспериментов. Наиболее оптимальным способом оказался следующий: вблизи торцевой области образца бишофита, сверху и снизу, надевалась резиновая манжета, на которую крепились датчики, отвечающие за измерение продольной деформации (рисунок 2.12), в центральной части образца с помощью резиновой манжеты, с диаметрально противоположных сторон, утягивались специальные плашки, с небольшой канавкой в середине, необходимой для точной установки датчика, отвечающего за измерение поперечной деформации образца (рисунок 2.14). Общий вид датчиков и образца, подготовленного к исследованию представлен на рисунке 2.9.

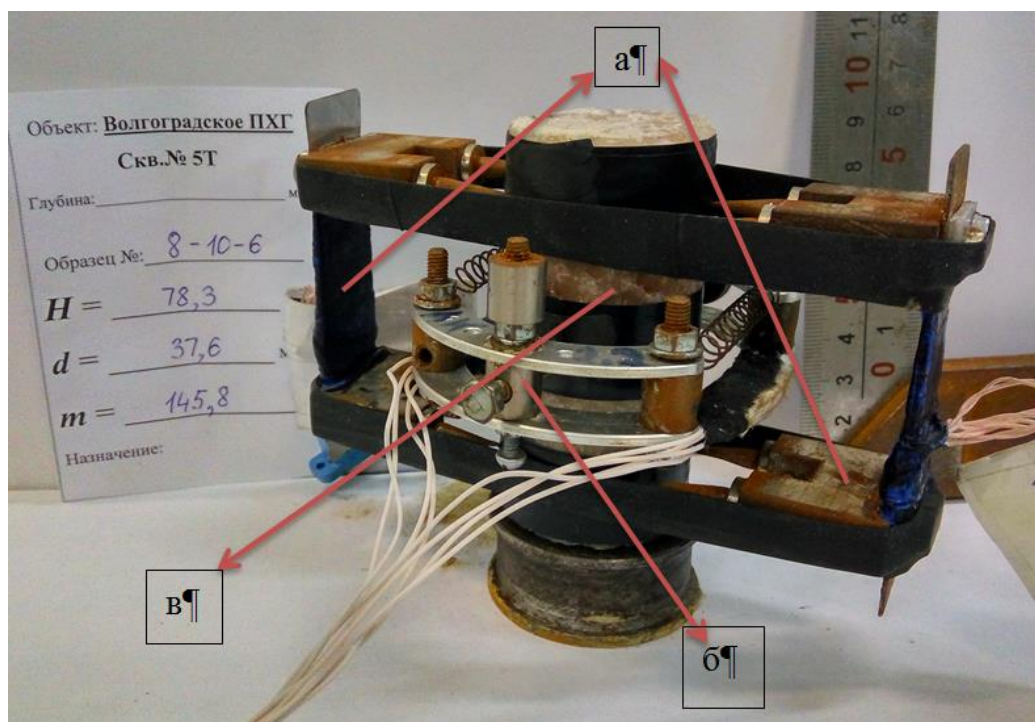


Рисунок 2.9 – Схема установки датчиков измерения продольных (а) и поперечных (б) деформаций на образец бишофита (в)

2. Для определения предела прочности при объемном сжатии и определения реологических свойств образец бишофита изолировался от проникновения в него жидкости, передающей гидростатическое давление вместе с приложенными к его торцам стальными плитами. Изоляция осуществлялась при помощи трубчатой резины, которая закрывала как боковую поверхность образца, так верхнюю и нижнюю плиту, изолирующие торцы. После того, как образец упакован в трубчатую резину, необходимо поверх нее в месте контакта образца с металлической плитой дополнительно нанести слой резины в 3-4 см, чтобы предотвратить вероятность пробоя оболочки в процессе эксперимента. Стальные плиты выбирались с незначительно большим диаметром, чем диаметр самого образца, если плиты будут меньшего диаметра, то в момент, когда будет создано давление на образец, произойдет «вминание» плиты в сам образец, чего быть не должно, т.к. нагрузка должна передаваться на всю площадь образца.

На изолированном образце, в центральной его части, фиксировался кольцевой датчик без съемной базы (рисунок 2.14б), отвечающий за измерение поперечных деформаций, затем полностью подготовленный к эксперименту образец устанавливался в рабочую полость камеры. На рисунке 2.10 показан образец, подготовленный для проведения испытаний по определению предела прочности при объемном сжатии и проведения реологических испытаний в сложном напряженном состоянии.

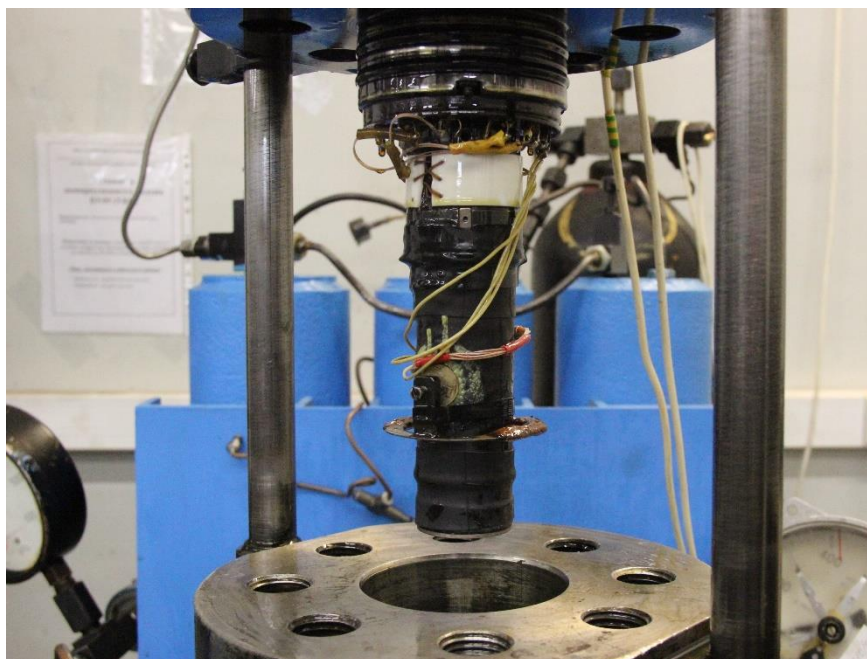


Рисунок 2.10 – Фото образца, подготовленного к проведению испытаний в сложном напряженном состоянии

3. Для определения предела прочности бишофита при растяжении какой-то специальной подготовки образца к проведению испытаний не требовалось.

2.3 Характеристика испытательного и измерительного оборудования

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. Применяемое измерительное оборудование [121] осуществляет регистрацию в режиме онлайн продольных и поперечных деформаций образца, осевых и боковых нагрузок, а также термобарических параметров нормальных условий для проведения экспериментов.

Применялось следующее испытательное и измерительное оборудование.

1. Определение предела прочности при одноосном сжатии и растяжении и деформационных характеристик бишофита в одноосном режиме осуществлялось на универсальной гидравлической машине (испытательный пресс) ТП-1-1500 с максимальной нагрузкой 100 тонн. Пресс оборудован датчиком давления, который фиксировал изменение нагрузки на образец во время проведения испытания. Регистрация физических величин: нагрузки или напряжения, а также деформаций, осуществлялась через программный комплекс press.exe, который является неотъемлемой частью испытательного пресса. Общий вид испытательного пресса показан на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Общий вид испытательного пресса ТП-1-1500

2. Тензорезисторы с базой измерения 15 и 20 мм. Тензорезисторы наклеивались на металлическую поверхность специальной формы, что в дальнейшем являлось датчиком для измерения продольных и поперечных деформаций образца.

3. Продольные деформации измерялись двумя игольчатыми балками с базой измерения 50мм, представленными на рисунке 2.12. На балку приклеивались два тензорезистора, спаянные в мостовую схему. Два датчика плотно прижимались к образцу с диаметрально противоположных сторон.

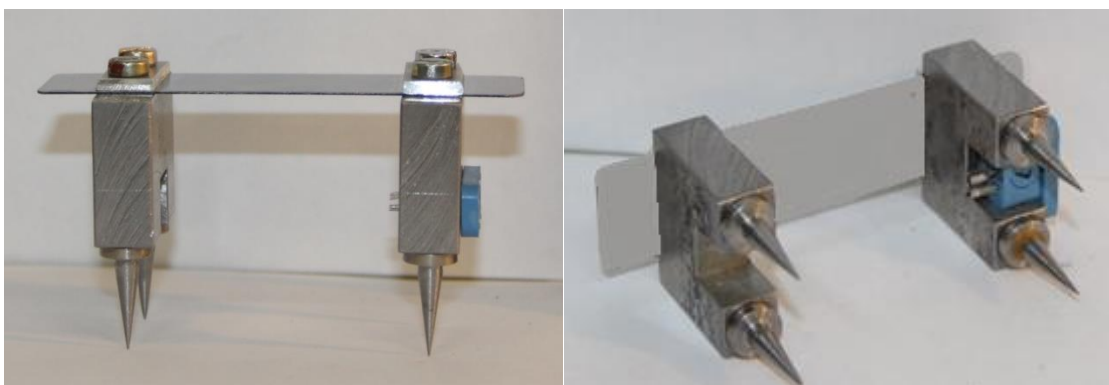


Рисунок 2.12 – Игольчатый датчик продольных деформаций

Также при проведении экспериментов измерение продольных деформаций осуществлялось индикатором часового типа ИЧ-50, рисунок 2.13, в верхней части штока которого устанавливалось металлическое основание, на которое приклеиваются тензорезисторы, распаянные также, как и у игольчатых датчиков в мостовую схему. Точность измерения составляет 0,001 мм.

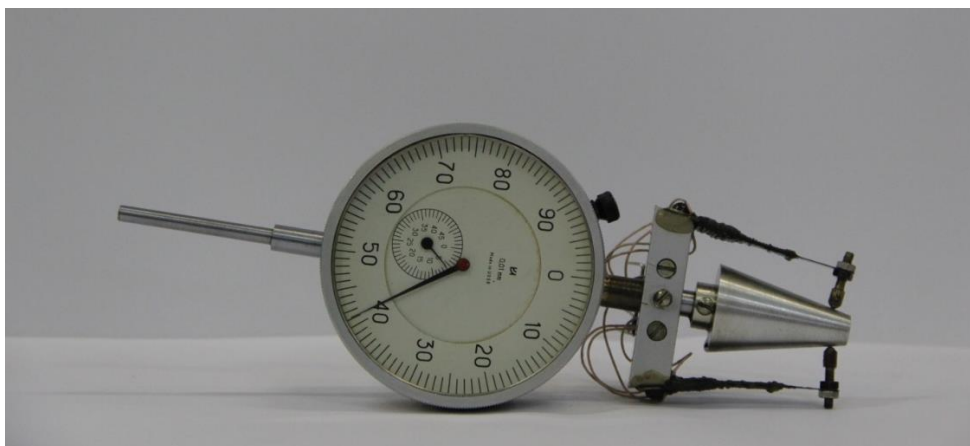
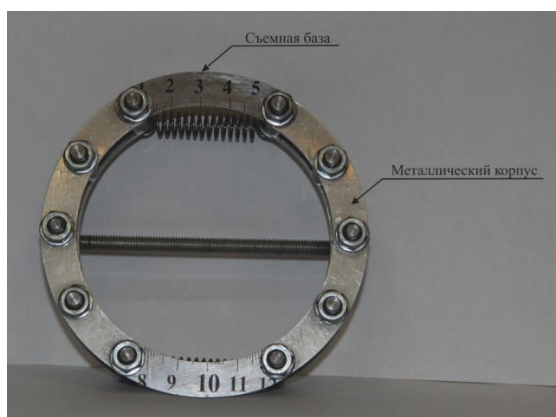


Рисунок 2.13 – Модернизированный индикатор часового типа ИЧ-50

4. Измерение поперечных деформаций в процессе эксперимента осуществлялось с помощью кольцевого датчика (рисунок 2.14), который представляет собой металлическое кольцо, на которое наклеены четыре тензометрических датчика, распаянные в мостовую схему. На образце такое кольцо закреплялось с помощью двух, расположенных с диаметрально противоположных сторон, фиксаторов. Такие фиксаторы при помощи винтов имеют жесткое крепление к боковой поверхности образца. Точность измерения составляет 0,0001 мм. В испытаниях применялись кольца со съемной базой и без съемной базы.



(а)



(б)

Рисунок 2.14 – Кольцевой датчик для измерения поперечных деформаций образца со съемной базой (а) и без съемной базы (б)

5. Испытания по определению предела прочности при объемном сжатии производились на установке компрессионного сжатия – УКС (рисунок 2.15). Регистрация усилия на образец осуществлялась динамометром, рассчитанным на нагрузку в пределах 0-200 кН. Визуальный контроль за величиной бокового давления на образец осуществлялся манометром образцовым, рассчитанным на давление до 60 МПа. Визуальный контроль за величиной осевого давления на образец осуществлялся манометром техническим, рассчитанным на давление до 100 МПа. Регистрация продольной деформации образца (перемещение плунжера) осуществлялась индикатором часового типа ИЧ-50 кл.1 (рисунок 2.13), рассчитанным на измерение в пределах 0-50 мм, базовыми точками которого являются корпус испытательной камеры и поршень 2. Гидравлическая

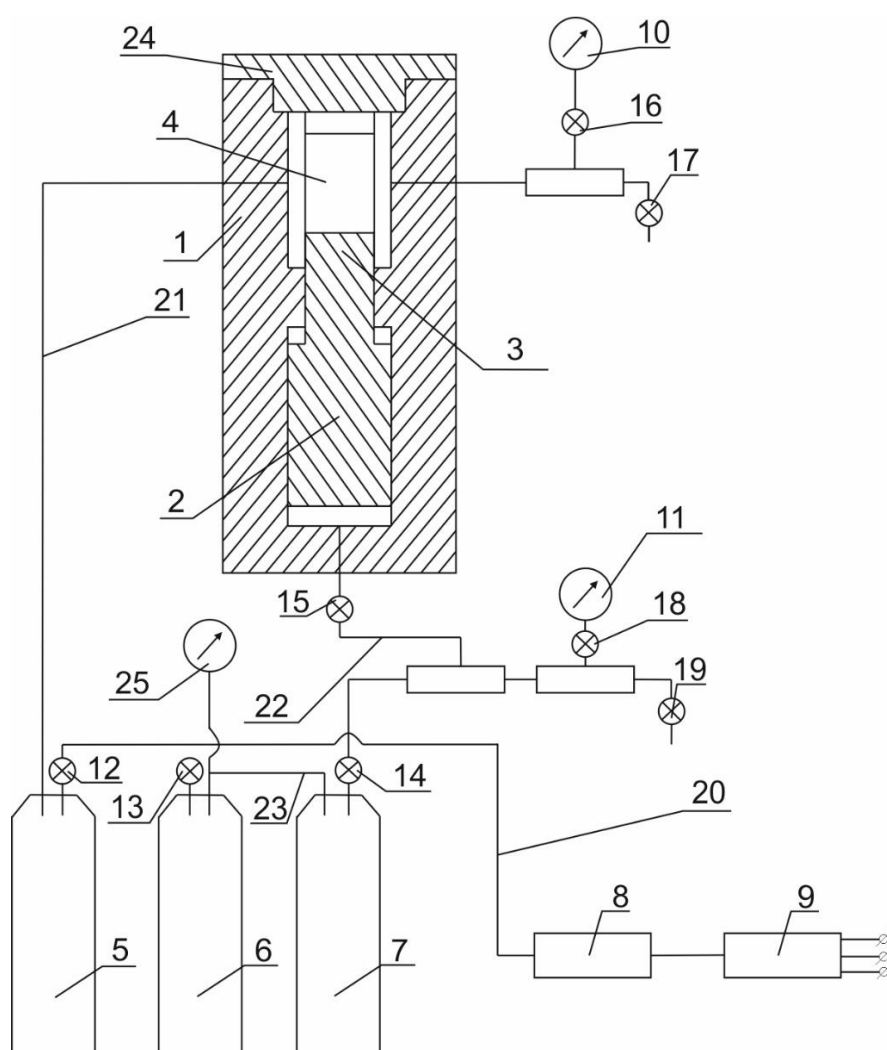
схема установки изображена на рисунке 2.16. Регистрация поперечной деформации образца осуществлялась кольцевым тензометрическим датчиком (рисунок 2.14 б), установленным в центральной части образца. Установка содержит испытательную камеру 1 с крышкой 24, поршнем 2 и плунжером 3. Испытываемый образец породы 4 расположен в рабочей полости камеры. Для создания осевых и боковых давлений на образец используются ресиверы 5–7, заполненные компрессорным маслом. Давление в ресиверах создается с помощью электродвигателя 9 и насосной станции 8. В установке используются также трубопроводы 20-23, манометры 10, 11 и 25, краны 12-19. Продольные деформации образца измерялись индикатором часового типа, базовыми точками которого являлись корпус испытательной камеры и поршень 2.



Рисунок 2.15 – Общий вид установки компрессионного сжатия (УКС)

Таблица 2.1 – Технические характеристики установки компрессионного сжатия (УКС)

Предел прочности при одноосном сжатии испытываемого образца, МПа	0,5 - 200
Максимальное осевое давление на образец, МПа	не более 80
Максимальное боковое давление на образец, МПа	не более 60
Максимальная продольная деформация испытываемого образца, мм	не более 20
Максимальные размеры испытываемого образца	диаметр, мм - 42 ± 1 высота, мм - 84 ± 1
Габаритные размеры установки, мм	не более 800x1000x1650
Масса установки, кг	не более 500



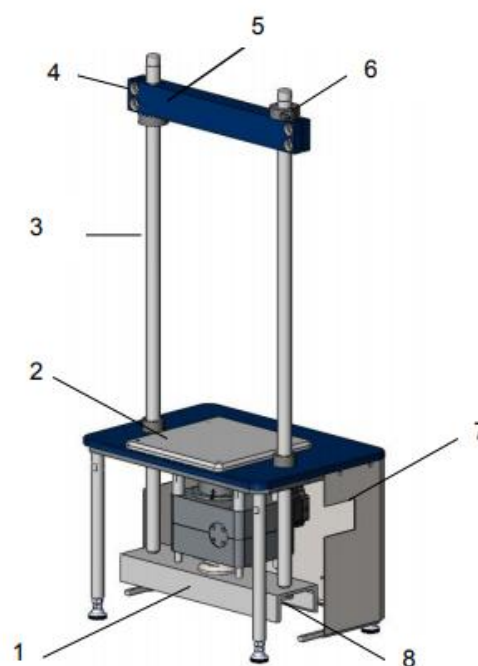
1 - испытательная камера, 2 - поршень, 3 - плунжер, 4 - испытываемый образец горной породы, 5–7 - ресиверы для создания осевых и боковых давлений на образец, 8 – насосная станция, 9 – электродвигатель, 10 и 11 – манометры, 12-19 – краны, 20-23 - трубопроводы, 24 – крышка камеры, 25 – манометр
Рисунок 2.16 – Гидравлическая схема установки компрессионного сжатия

6. Изучение реологических свойств бишофита в условиях одноосного ступенчатого нагружения проводилось с использованием автоматизированного испытательного комплекса «АСИС». Устройство осевого нагружения ГТ 2.0.8, входящее в состав комплекса, позволяет создавать максимальную нагрузку на образец, равную 30 кН. Также данное устройство оснащено датчиками перемещения, необходимыми для непрерывного измерения осевых деформаций образца в течение всего эксперимента. Фотография и схема устройства осевого нагружения установки представлена на рисунке 2.17.

Относительная погрешность измерения продольных деформаций не превышала 0,96%, а поперечных деформаций – 0,65%. Относительная погрешность датчика силы, отвечающего за регистрацию нагрузки не превышала 0,4%.



(а)



(б)

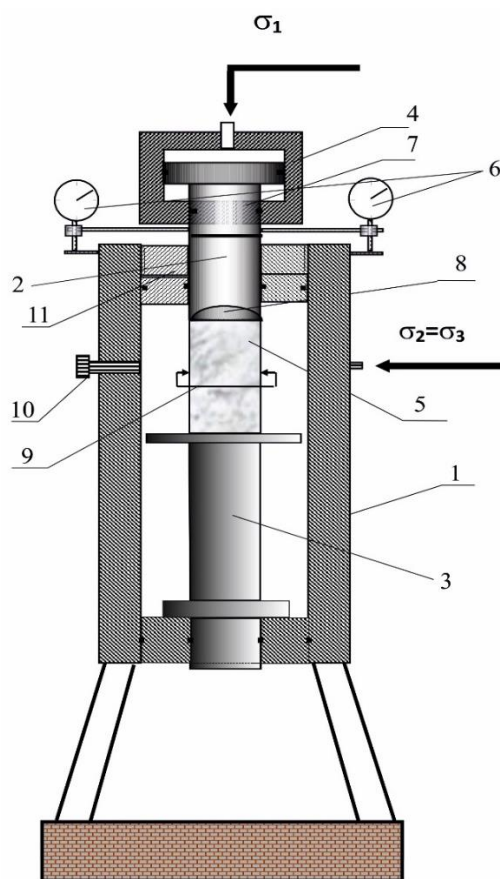
Рисунок 2.17 – Фотография испытательного оборудования с установленным образцом бишофита (а) и схема устройства осевого нагружения (б) – вид без передней обшивки корпуса: 1 – основание рамы; 2 – столик; 3 – стойка; 4 – винт; 5 – балка; 6 – кольцо опорное; 7 – платформа; 8 – болт

Данный комплекс имеет возможность задания длительности ступени нагружения и нагрузки, действующей на этой ступени. Измерение нагрузок и деформаций на образце осуществлялось в автоматическом режиме с периодом измерения 1 с.

7. Исследования реологических свойств в условиях трехосного напряженного состояния проводились на испытательном реологическом комплексе БУ-61. Каждая установка позволяет создавать независимые друг от друга нагрузки в классе напряженного состояния, соответствующего обобщенному сжатию ($\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$). Фотографии установок представлены на рисунке 2.18 (а), а конструкция одной из установок приведена на рисунке 2.18 (б).



(а)



(б)

1 – корпус камеры; 2 – верхний шток; 3 – нижний шток; 4 – цилиндр гидродомкрата; 5 – образец горной породы; 6 – индикаторы часового типа; 7 – поршень гидродомкрата; 8 – полусфера; 9 – кольцевой датчик измерения поперечных деформаций образца; 10 – электроввод; 11 – крышка

Рисунок 2.18 – Общий вид испытательного реологического комплекса БУ-61 (а); схема камеры всестороннего сжатия БУ-61 (б)

Гидравлическая установка долговременного испытания горных пород на ползучесть в условиях объемного сжатия БУ-61 представляет собой комплекс из шести унифицированных камер трехосного сжатия, причем каждая камера работает автономно и имеет свой гидрораспределительный стенд. Каждый стенд снабжен двумя ресиверами, которые поддерживают постоянные значения осевых и боковых нагрузок при проведении испытаний. Данная система поддержания напряжений лишена электропривода, в связи, с чем продолжительность испытаний может быть любой.

Измерение нагрузок и деформаций на образце производится в автоматическом режиме с периодом измерения 1 с. Полная картина деформирования и нагружения образца в камере в масштабе реального времени выводится на монитор оператора. Время макрокадра, т.е. частота обновления значений на мониторе, составляет 1 Гц. Это позволяет в реальном масштабе времени с одно-временной архивацией и визуализацией экспериментальных данных просматривать и анализировать получаемые данные. Пример визуализации эксперимента на мониторе оператора представлен на рисунке 2.19.

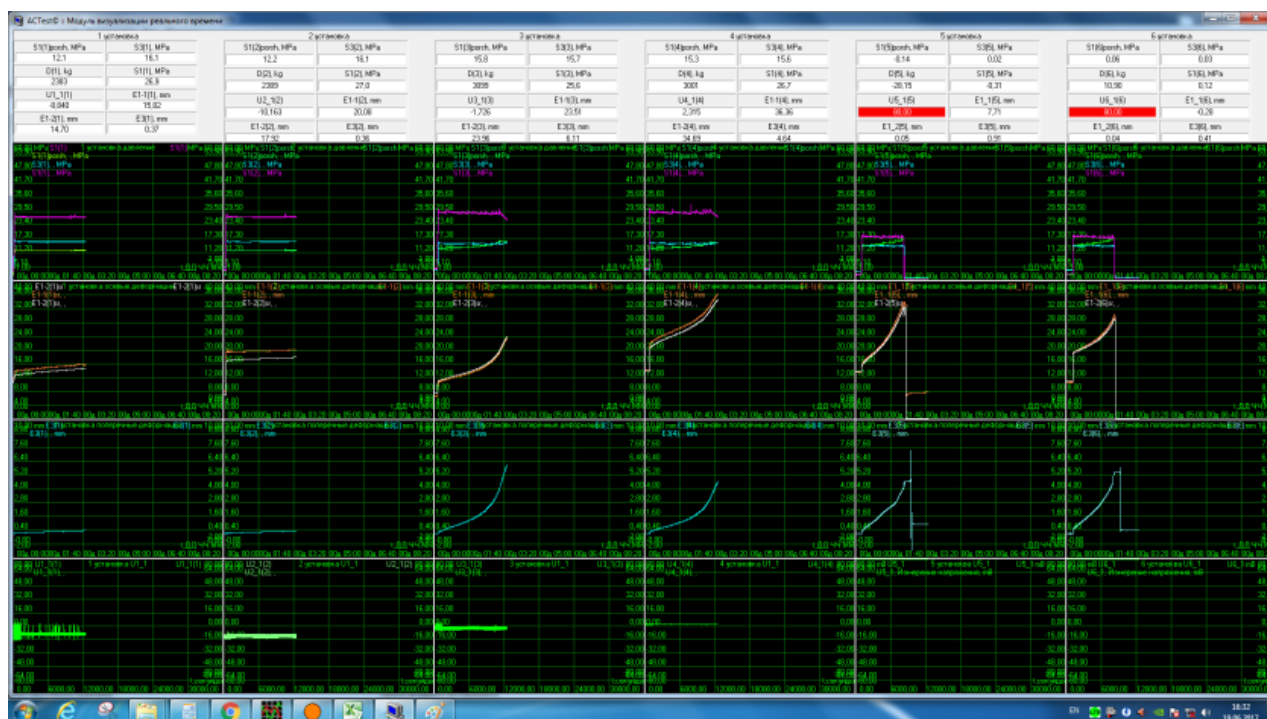


Рисунок 2.19 – Окно оператора во время проведения реологических испытаний

2.4 Подготовка измерительного оборудования к проведению испытаний

Описанное выше измерительное оборудование: кольцевой датчик для измерения поперечных деформаций, игольчатый датчик для измерения продольных деформаций являются уникальными измерительными устройствами, которые применялись при массовых испытаниях образцов, поэтому перед каждой новой серией экспериментов осуществлялась тарировка показателей измеряемых величин. Тарировка производилась через программный комплекс АCTest или press.exe. Подключенный датчик к системе визуализируется в программе в виде числа в единицах напряжения мВ. Так как данный датчик является собственной разработкой, то тарировка необходима для того, чтобы установить, что коэффициент корреляции близок к единице, в противном случае таким датчиком пользоваться нельзя.

Проводилось сравнение изготовленных датчиков с тензорезисторами, приклеенными на образец, т.к. чувствительность тензорезисторов составляет $10^{-5} - 10^{-6}$ мкм. Это говорит о том, что из всех рассматриваемых датчиков [122], тензорезисторы являются самыми чувствительными к изменению деформаций. Плюс данного метода измерения деформаций заключается также в том, что тензорезистор клеится непосредственно на сам образец, что не привносит никаких дополнительных деформаций (погрешности) от системы. Но есть один большой недостаток, тензорезисторы, приклеенные на образец, одноразовые и могут порваться в любой момент в процессе испытания из-за роста трещин в образце, скола и т.п., что делает процесс испытания образца непредсказуемым, к тому же аппликация тензорезисторов на образцы бишофита не представляется возможным, ввиду его сверхгигроскопичности. В качестве примера, на рисунке 2.20, показана полная диаграмма деформирования образца №30 Мозырской площади, скважина №16э, где видно, что тензорезистор, отвечающий за измерение поперечных деформаций, порвался в процессе испытания.

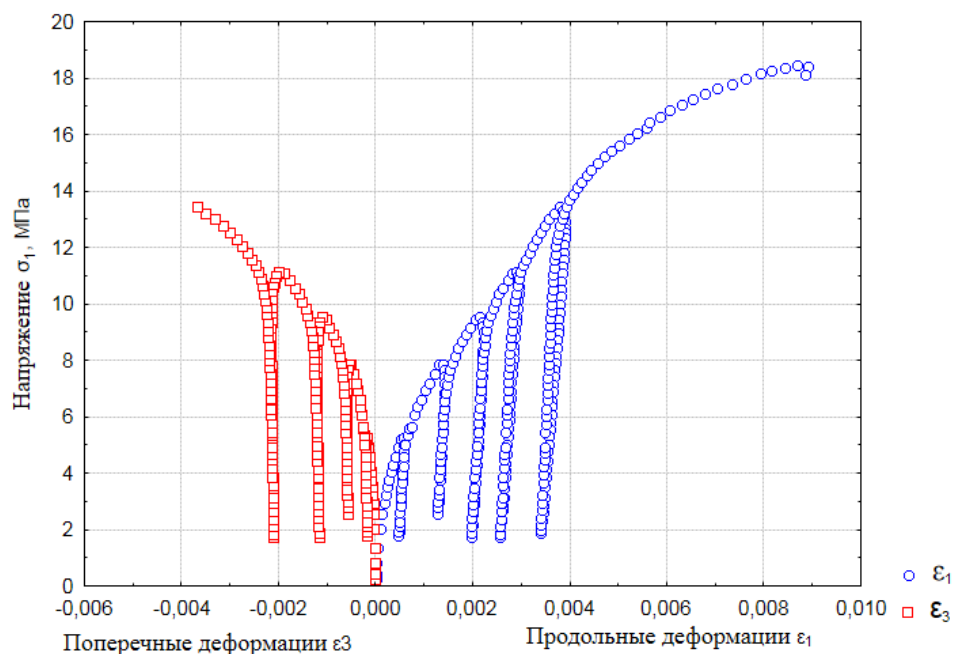


Рисунок 2.20 – Полная диаграмма деформирования образца №30 Мозырской площади, скважина №16э

Это поставило перед автором задачу разработки новых датчиков или модернизации существующих (рисунки 2.12, 2.13 и 2.14), которые обладали бы такой же степенью чувствительности, как и тензорезисторы, были бы надежными (минимально 15-20 испытаний) и охватывали бы больше 10 структурных неоднородностей образца.

Необходимо было убедиться, что показаниям разработанных датчиков можно доверять, поэтому осуществлялась оценка точности измерения разработанных датчиков. С этой целью брался металлический образец с известными упругими свойствами: модуль упругости $E_y=200$ ГПа и коэффициент Пуассона $\nu=0,25$, также на металлический образец, наряду с датчиками, как показано на рисунке 2.21, были приклеены тензорезисторы и протарированы на прессе ТП-1-1500.

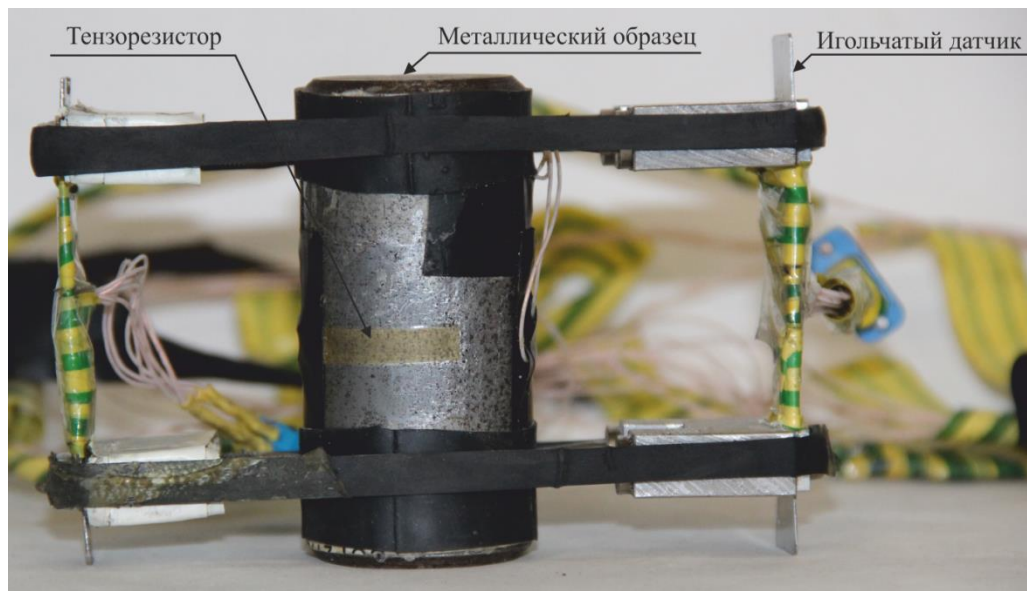


Рисунок 2.21 – Металлический образец с приклеенными тензорезисторами и закрепленными на нем игольчатыми датчиками

На рисунке 2.22 показано сравнение результатов двух способов измерения деформаций.

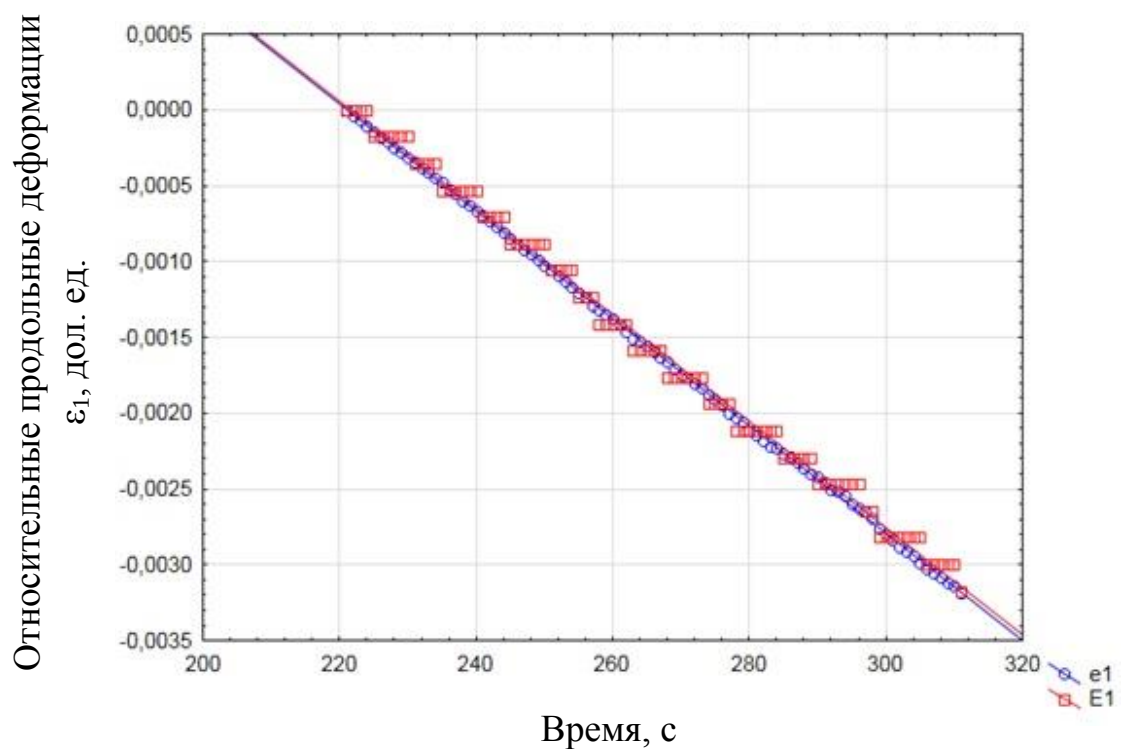


Рисунок 2.22 – Зависимости деформаций от времени для металлического образца с приклеенными тензорезисторами $e1$ и с тензорезисторами, приклеенными на игольчатый датчик $E1$

Уравнение аппроксимации приклеенных тензорезисторов на металлический образец имеет вид $y_1=0,0078-3,5417E-5 \cdot x$, а у игольчатого датчика - $Y_1=0,0078-3,5252E-5 \cdot x$, что практически идентично предыдущему уравнению.

На рисунке 2.23 видно, что чувствительность игольчатого датчика Y_1 несколько уступает чувствительности самого тензорезистора y_1 , непосредственно приклеенного на металлический образец. Эта дискретность датчика изменяется в интервале от 10^{-3} до $2 \cdot 10^{-3}$, что полностью соответствует требованиям для испытания образцов горных пород и никак не искажает результаты экспериментов.

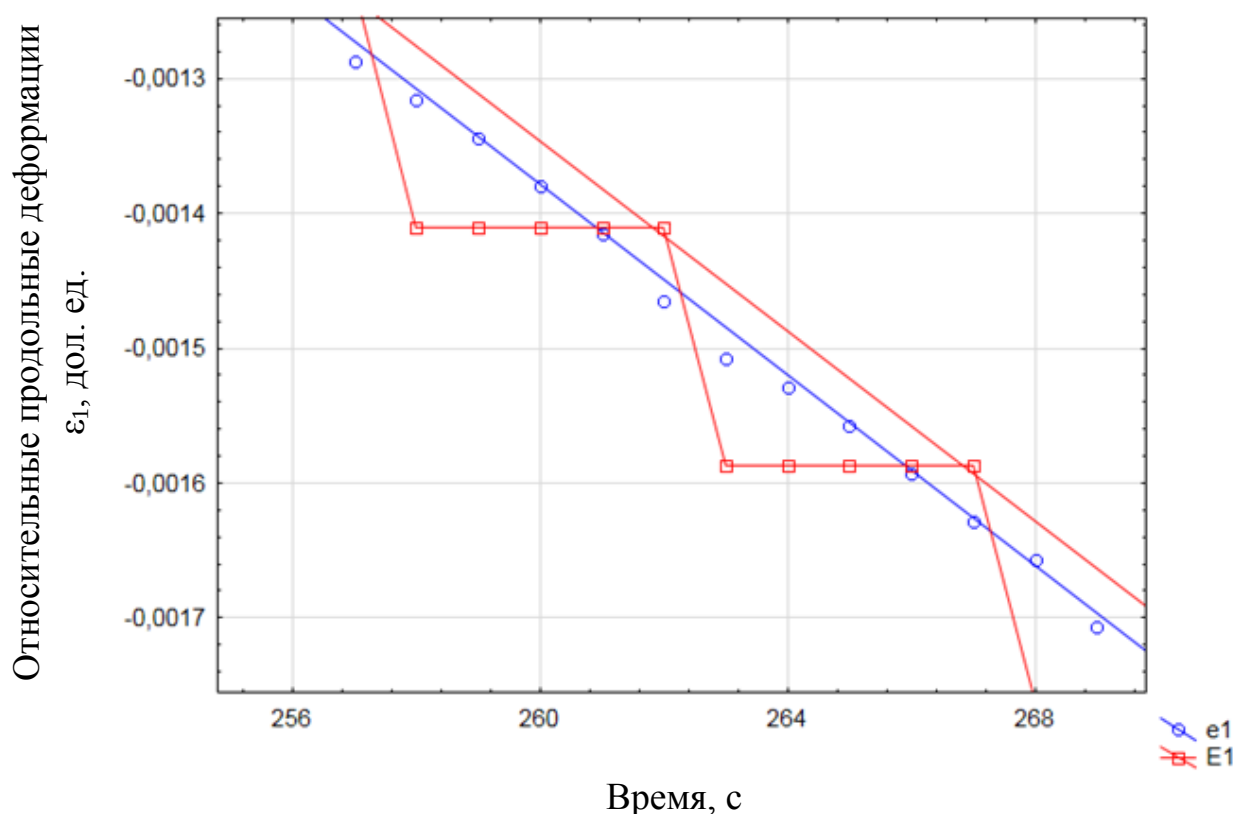


Рисунок 2.23 – Сравнение чувствительности металлического образца e_1 с приклеенными тензорезисторами и игольчатого датчика E_1

По параметрическим каналам измеряемые величины записывались в единицах напряжения – мВ, в диапазоне от -80мВ до 80мВ. Для того чтобы пересчитать эти значения для датчиков деформаций в миллиметры производится их тарировка. В качестве тарировочных коэффициентов, через которые осуществляется перерасчет значений приходящих сигналов в мВ от датчиков

через измерительную систему АCTest к компьютеру и измеряемых параметров, принимался коэффициент корреляции в виде прямой, которая описывала зависимость исходных измеряемых величин от значений параметрических каналов, мВ.

На рисунке 2.24 и 2.25 представлены тарировочные зависимости игольчатого датчика, отвечающего за измерение продольных деформаций и кольцевого датчика, отвечающего за измерение поперечных деформаций. Также на рисунках показан коэффициент корреляции Пирсона для прямой, которой аппроксимировалась зависимость.

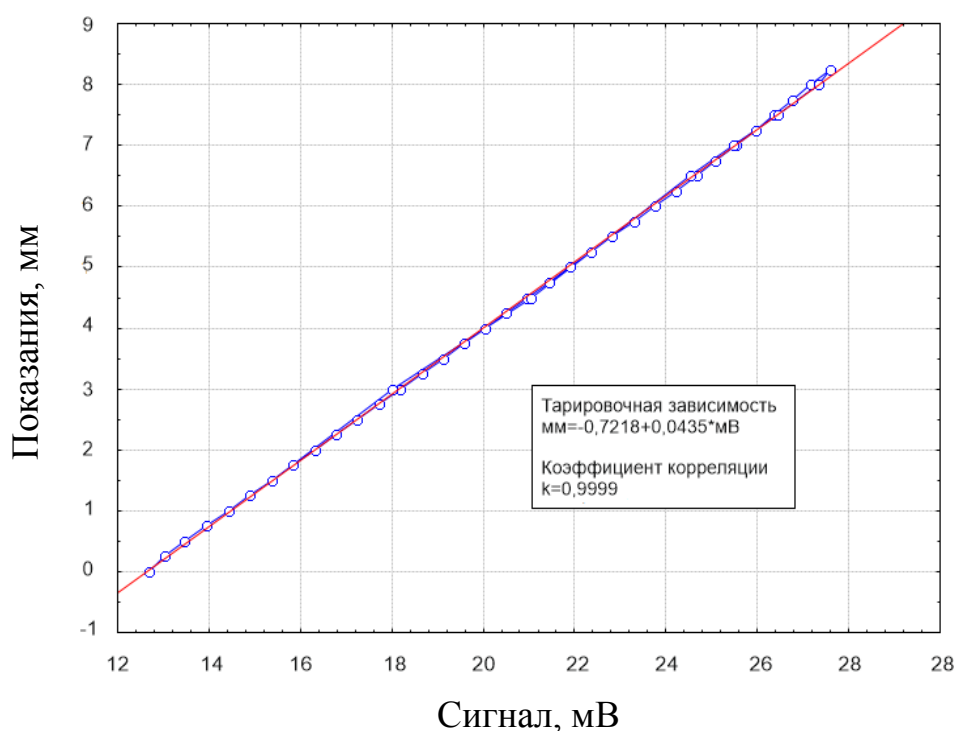


Рисунок 2.24 – Тарировочная зависимость игольчатого датчика

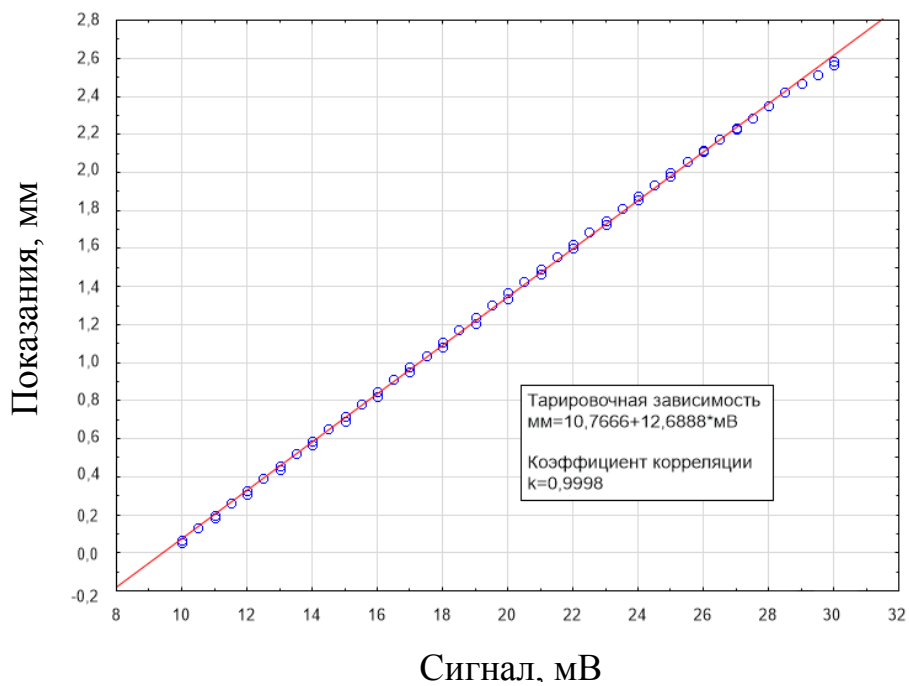


Рисунок 2.25 – Тарировочная зависимость кольцевого датчика со съемной базой

Как видно по тарировочной зависимости на рисунке 2.24, игольчатый датчик, отвечающий за измерение продольных деформаций ведет себя упруго как на ветви нагрузки, так и на ветви разгрузки, т.е. отсутствует гистерезис самого металла, который может быть вызван выходом за пределы упругости как в процессе тарировки, так и во время проведения испытания. Вследствие чего можно сделать вывод, что те деформации образца, которые измеряет данный датчик в процессе проведения эксперимента, являются достоверными, т.е. в них отсутствуют деформации, которые может привносить сам датчик. Это подтверждается прямолинейной зависимостью и коэффициентом корреляции $k=0,9999$.

То же относится и к кольцевому датчику, рисунок 2.25, отвечающему за измерение поперечных деформаций образца во время проведения испытаний, у которого получена прямолинейная тарировочная зависимость с коэффициентом корреляции $k=0,9998$, т.е. показания такого датчика являются надежными.

Расчет относительных продольных деформаций образца производится по формуле

$$\varepsilon_1 = \frac{x_1 + x_2}{2h}, \quad (2.1)$$

где x_1 и x_2 – абсолютные продольные деформации датчиков, показания которых определяются с использованием регистрирующей системы, вычисляются по тарировочным уравнениям (2.2) и (2.3), мм;

h – высота образца, мм.

$$x_1 = -0,7218 + 0,0435u \quad (2.2)$$

$$x_2 = -0,9365 + 0,0398u, \quad (2.3)$$

где u – приращение напряжения, мВ.

Расчет относительных поперечных деформаций образца производится по формуле

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \frac{x_3}{d}, \quad (2.4)$$

где x_3 – абсолютные поперечные деформации датчика, показания которого определяются с использованием регистрирующей системы, вычисляются по тарировочному уравнению (2.5), мм;

d – диаметр образца, мм.

$$x_3 = 10,7666 + 12,6888u, \quad (2.5)$$

где u – приращение напряжения, мВ.

2.5 Выводы по главе 2

1. Подробно описаны методика изготовления образцов бишофита и меры по обеспечению их сохранности во избежание контакта с окружающей средой ввиду его высокой гигроскопичности.

2. Разработаны и изготовлены специализированные датчики перемещений, а также подробно описана методика фиксации их на образце.

3. Подробно описано оборудование, на котором проводились все испытания.

3 Экспериментальное определение прочностных и деформационных свойств образцов бишофитовой породы

3.1 Общая характеристика образцов, используемых при испытаниях

Как правило, определение тех или иных свойств образца регламентируются нормативной документацией. Так, определение прочностных свойств, предела прочности при одноосном растяжении σ_r , предела прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, предела прочности при объемном сжатии $\sigma_{сж}^0$ и определение деформационных характеристик горных пород: модуля деформации E_d , модуля упругости E_y и коэффициента Пуассона ν регламентируются соответствующими ГОСТами [122, 123, 124, 125].

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению прочностных и деформационных свойств бишофитовой породы в условиях одноосного нагружения. Как уже было сказано в предыдущей главе, для исследований использовался керновый материал с Волгоградского месторождения.

Все испытания проводились при нормальных условиях.

3.2 Определение прочностных свойств бишофитовой породы в одноосном режиме нагружения

3.2.1 Определение предела прочности при одноосном сжатии

Испытания в одноосном напряженном состоянии проводились на испытательном прессе ТП-1-1500 (рисунок 2.11). Образцы испытывались с постоянной скоростью нагружения 0,5 МПа/с. Нагрузка на образец передавалась через плоские стальные плиты.

На сжатие было испытано 12 образцов бишофита. Образцы изготавливались с соотношением высоты к диаметру, приближенному к $h/d=2/1$. Геометрические размеры испытанных образцов изменялись в следующих пределах: высота 63,0 мм– 86,0 мм, диаметр 33,2 мм – 41,2 мм. Пример изготовленного образца бишофита на одноосное сжатие представлен на рисунке 3.1.

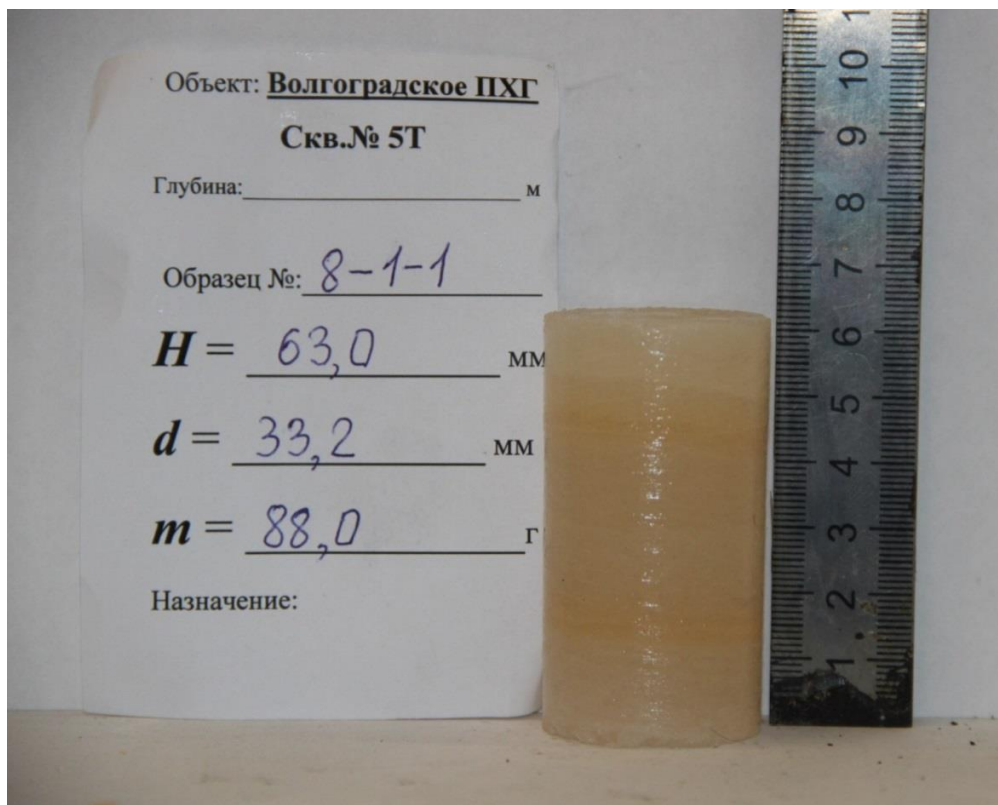


Рисунок 3.1 – Образец бишофита №8-1-1, изготовленный из кернового материала Волгоградского месторождения, скважина №5т

Для управления испытательным прессом использовался программный комплекс press.exe. Данный комплекс позволил в процессе проведения испытаний осуществлять непрерывную запись деформации и нагрузки с интервалом в одну секунду, что дало возможность в реальном времени наблюдать за поведением образца вплоть до потери его несущей способности, т.е. до разрушения. Пределы прочности при одноосном сжатии по всем испытанным образцам представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты определения предела прочности при одноосном сжатии образцов бишофита

№ образца	Предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Среднее $\bar{\sigma}$, МПа	С.к.о. Δ , МПа	Коэффициент вариации V , %
6-19-2	5,5	5,9	1,8	30,5
6-21-1	4,1			
7-2-1	4,5			
7-2-3	9,0			
7-14-3	5,2			
7-14-4	5,8			
7-15-1	5,7			
8-2-1	9,3			
8-3-1	6,5			
8-4-1	6,2			
8-6-1	5,8			
8-6-3	2,8			

Ввиду ограниченного количества образцов одновременно проводились испытания по определению деформационных характеристик бишофита, поэтому на рисунке 3.2 на полных диаграммах показаны ветви разгрузки.

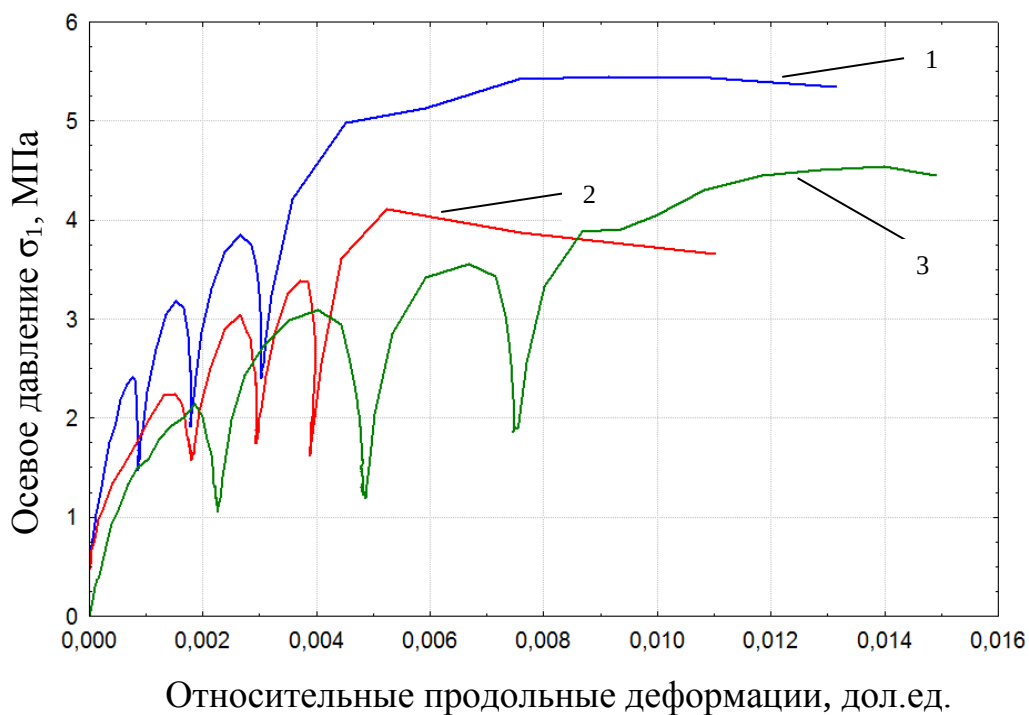


Рисунок 3.2 – Полные диаграммы деформирования образцов бишофита №6-19-2 (1), №6-21-1 (2), №7-2-1 (3)

3.2.2 Определение предела прочности при одноосном растяжении

На растяжение было испытано 11 образцов бишофита. Образцы изготавливались с соотношением высоты к диаметру, приближенному к $h/d=1/1$. Геометрические размеры испытанных образцов изменялись в следующих пределах: высота 37,4 мм – 65,3 мм, диаметр 40,4 мм – 72,2 мм.

Эксперименты проводились на том же испытательном прессе ТП-1-1500, что и при одноосном сжатии, по ГОСТ 21153.3-85, по «бразильской» методике, сущность которой заключается в том, что образец помещался между плоскими плитами пресса, а приложение нагрузки происходило по его образующим.

Пример изготовленного образца бишофита на одноосное растяжение представлен на рисунке 3.3.

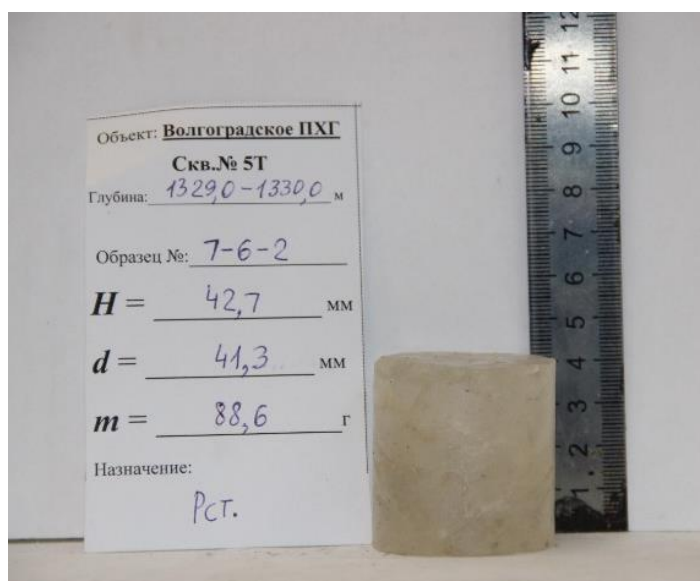


Рисунок 3.3 – Образец бишофита №7-6-2, изготовленный из кернавого материала Волгоградского ПХГ, скважина №5т

Пределы прочности при одноосном растяжении по всем испытанным образцам представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты определения предела прочности при одноосном растяжении образцов бишофита

№ образца	Предел прочности при одноосном растяжении $\sigma_{\text{рст}}$, МПа	Среднее $\bar{\sigma}$, МПа	С.к.о. Δ , МПа	Коэффициент вариации V , %
7-2-4	0,47	0,68	0,15	22,5
7-4-3	0,87			
7-5-2	0,83			
7-6-2	0,85			
7-7-2	0,75			
7-9-2	0,74			
7-13-1	0,52			
7-13-3	0,72			
7-13-4	0,68			
7-17-5	0,50			
8-7-2	0,50			

3.3 Определение деформационных характеристик бишофитовой породы в одноосном режиме нагружения

Требования к определению деформационных свойств горных пород регламентированы ГОСТ 28985-91. Сущность метода заключается в измерении сжимающей силы, приложенной к торцам образца, его продольных и поперечных деформаций, вызванных этой силой. Измерение продольных деформаций образца реализуется за счет двух игольчатых балок (рисунок 2.12), измерение поперечных деформаций образца реализуется за счет кольцевого датчика (рисунок 2.14).

ГОСТ 28985-91 регламентирует определять деформационные характеристики горных пород в диапазоне требуемых напряжений. При этом интервал напряжений от 5% до 50% от предела прочности при одноосном сжатии является обязательным. В этом интервале нагрузок образец проявляет свои упругие свойства. Наиболее характерными участками проявления упругих свойств являются ветви «разгрузка», когда образец может либо полностью или отчасти

восстановить свои деформации без проявления упругопластических и пластических свойств.

Все вышеописанное действительно подходит для большинства горных пород, но, к сожалению, когда начались испытания бишофита по ГОСТ 28985-91, он оказался практически неприменимым в части использования измерительного оборудования и обработки результатов.

3.3.1 Методика проведения испытаний

Проведение испытаний образцов бишофита осуществлялось следующим образом. Предварительно, перед проведением экспериментов по определению деформационных свойств бишофита определялся предел прочности при одноосном сжатии. По результатам испытаний, согласно таблице 3.1, среднее значение предела прочности бишофита составило 5,9 МПа. Испытания проводились при одноосном сжатии с постоянной скоростью нагружения, значение которой не превышало 0,2 МПа/с. В процессе эксперимента регистрировались продольные и поперечные деформации. Количество циклов составляло не более четырёх. Все циклы нагрузка-разгрузка проводились в интервале от 5 до 50% от предела прочности при одноосном сжатии.

3.3.2 Результаты испытания бишофитовой породы и сравнение с каменной солью

С целью определения деформационных свойств всего было испытано 11 образцов бишофита из Волгоградского ПХГ скважины №5т.

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 3.4.

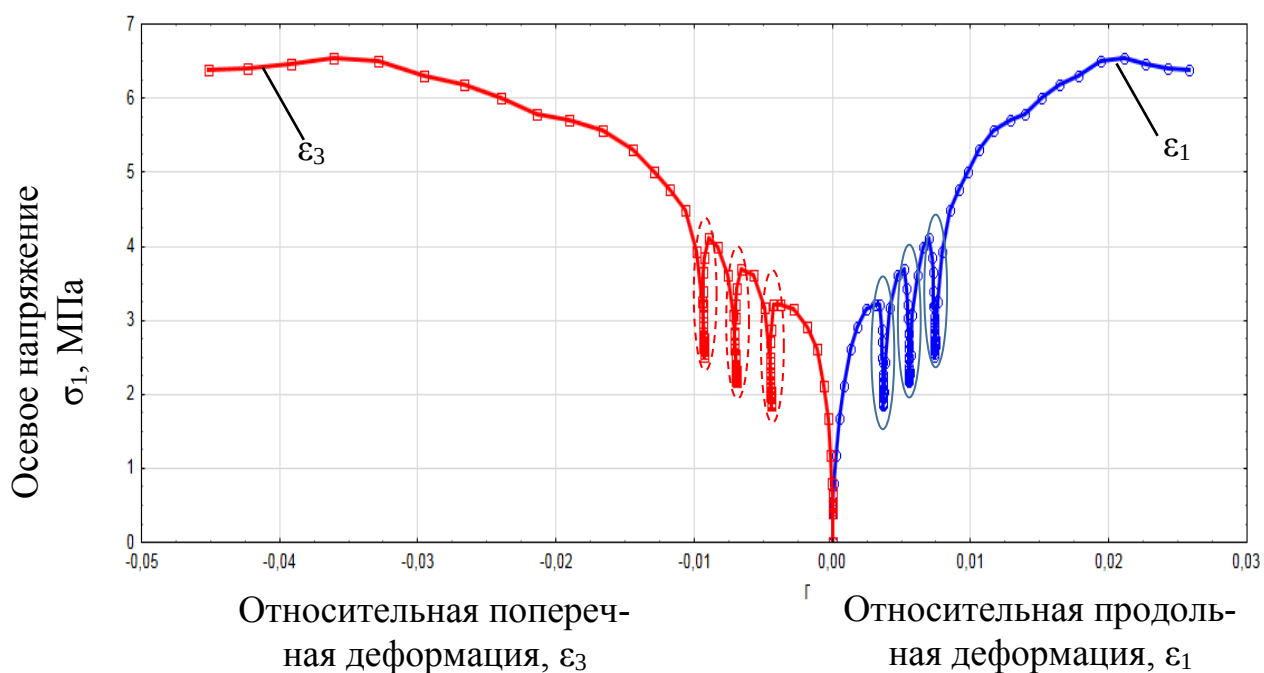


Рисунок 3.4 – Полная диаграмма деформирования образца бишофита №8-3-1

Для сравнения, также было испытано 26 образцов каменной соли из Волгоградского ПХГ скважины №8т с целью определения деформационных характеристик.

Пример полной диаграммы деформирования образца каменной соли №74-2 представлен на рисунке 3.5.

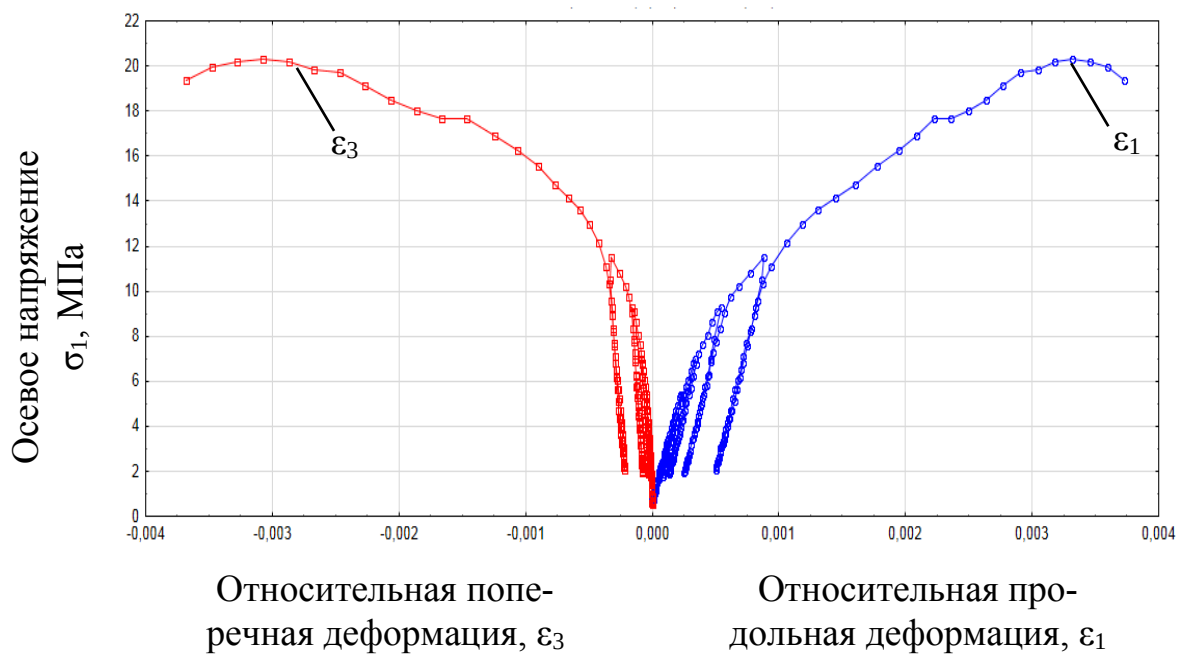


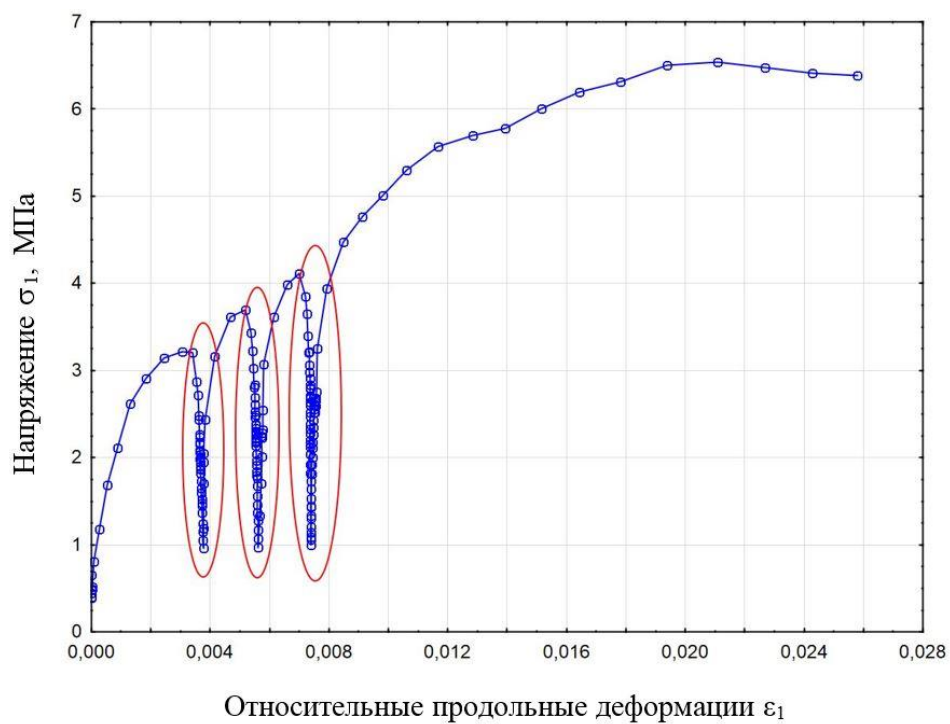
Рисунок 3.5 – Полная диаграмма деформирования образца каменной соли №74-2

Определение модуля деформации E_d , производилось на участках «нагрузка» по соотношению $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_1$ или графику зависимости $\sigma=f(\varepsilon_1)$. Определение величины модуля упругости E_y производилось на участке «разгрузка» для каждого цикла по соотношению $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon_1$. Значение модуля упругости образца рассчитывалось как среднее арифметическое по всем циклам «разгрузка». Определение величины коэффициента Пуассона μ производилось на участке «разгрузка» по соотношению $\Delta\varepsilon_3/\Delta\varepsilon_1$ для каждого цикла. Значение коэффициента Пуассона рассчитывалось как среднее арифметическое по всем циклам «разгрузка».

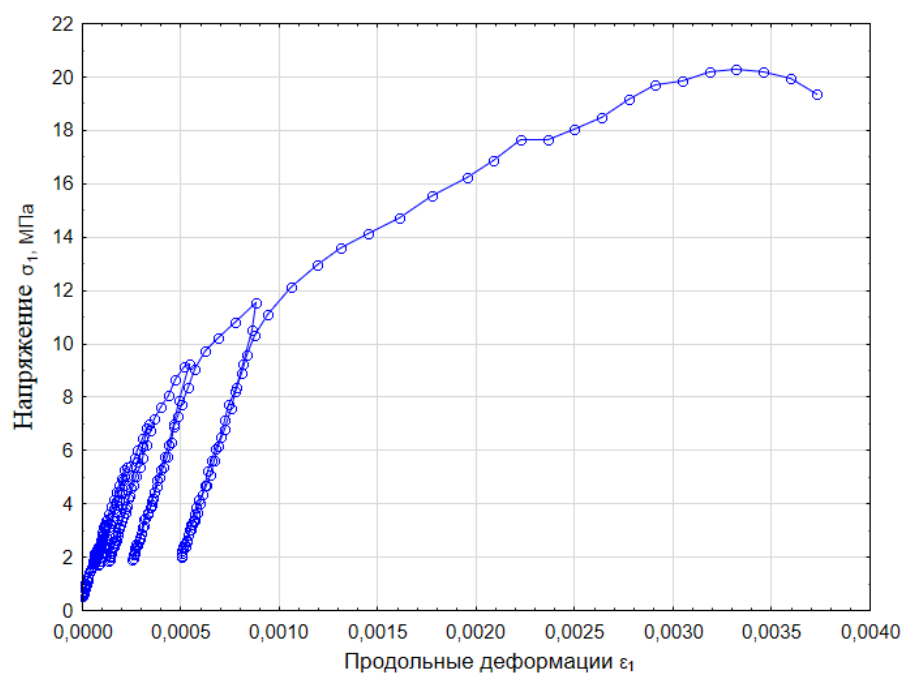
Различие полных диаграмм деформирования для бишофита и каменной соли обусловлено тем, что при незначительном приложении нагрузки к образцу бишофита происходили реологические процессы, вызванные этим воздействием.

3.3.3 Анализ результатов

Была обнаружена интересная особенность деформирования образцов бишофита при построении зависимостей продольных и поперечных деформаций от напряжения. На рисунке 3.6 и рисунке 3.7 приведено сравнение зависимостей продольных и поперечных деформаций от напряжения образца бишофита №8-3-1 и образца каменной соли №74-2.

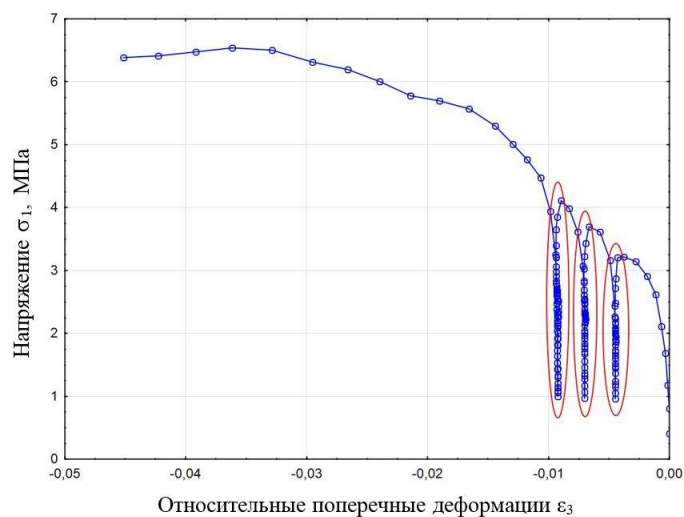


(а)

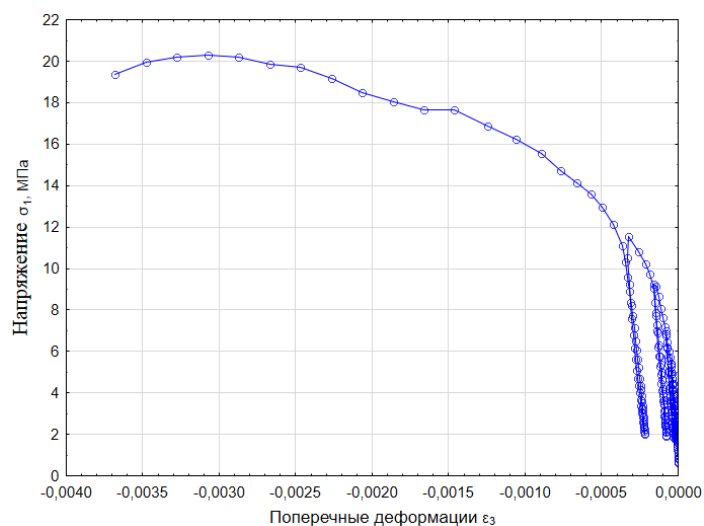


(б)

Рисунок 3.6 – График зависимости продольных деформаций от нагрузки образца бишофита №8-3-1 (а) и образца каменной соли №74-2 (б)



(а)



(б)

Рисунок 3.7 – График зависимости между поперечными деформациями и напряжением 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 3.6 (б) и 3.7 (б). Как видно из графиков 3.6 (а) и 3.7 (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.

Обработка результатов всех испытанных образцов бишофита позволила получить данные, представленные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Деформационные свойства образцов бишофита

Номер образца	Модуль деформации E_d , МПа	Модуль упругости E_y , МПа	Коэффициент Пуассона ν
6-19-2	694	4482	0,46
6-21-1	674	3504	0,31
7-2-1	313	4237	-
7-2-3	964	4567	0,22
7-14-3	708	3300	0,44
7-14-4	558	3363	0,49
7-15-1	628	4564	0,50
8-2-1	888	4513	0,36
8-3-1	269	2922	0,37
8-4-1	843	4310	0,31
8-6-3	306	2861	0,5

Статистическая обработка результатов определения деформационных свойств образцов бишофита, представленных в таблице 3.3, приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Статистические параметры деформационных свойств образцов бишофита

Статистические параметры	E_d , МПа	E_y , МПа	Коэффициент Пуассона ν
Среднее значение	623	3875	0,40
Стандартное отклонение	240	687	0,09
Коэффициент вариации, %	39	18	24

Обработка результатов испытаний всех образцов каменной соли позволила получить данные, представленные в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Деформационные свойства каменной соли Волгоградского ПХГ, скважина №1т

Номер образца	Модуль деформации E_d , МПа	Модуль упругости E_y , МПа	Коэффициент Пуассона ν
7	4713	26381	0,18
8-1	3605	28129	0,19
8-2	3228	29280	0,18
9-1	2803	21878	0,27
61-11	2119	29711	0,28
62-1	3500	28493	0,24
62-3	2634	28875	0,27
62-5a	1764	24267	0,28
63-9	1625	25431	0,18
120-1a	2575	28416	0,15
147-1a	2217	22333	0,19
163-1a	2490	29217	0,22
171-1a	2523	28936	0,21
176-1	2403	29284	0,20
180-1a	1805	29239	0,22
184-1a	2804	29174	0,22
187-1a	2323	24492	0,19
190a	1975	23997	0,21
192-3	1985	20162	0,20
197-1	3367	27234	0,20
201-1a	2864	24646	0,22
207-1a	2504	24159	0,21
210-1a	2368	19994	0,25
214-1a	4142	28408	0,23
216-1a	2477	22991	0,27
224a	1878	26909	0,23

Статистическая обработка результатов определения деформационных свойств каменной соли, представленных в таблице 3.5, приведена в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Статистические параметры деформационных свойств образцов каменной соли

Статистические параметры	E_d , МПа	E_y , МПа	Коэффициент Пуассона ν
Среднее значение	2642	26232	0,22
Стандартное отклонение	746	3040	0,04
Коэффициент вариации, %	28,2	11,6	16,3

Бишофит и каменная соль обладают существенно различными свойствами, как следует из данных таблиц 3.4 и 3.6. 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.

Тем самым подтверждается первое научное положение.

3.4 Определение прочностных свойств бишофитовой породы в сложном напряженном состоянии

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 21153.8-88 на установке компрессионного сжатия (рисунок 2.15). Сущность метода заключается в измерении разрушающей сжимающей силы, приложенной к торцам образца через стальные плоские плиты при боковом сжатии его гидростатическим давлением.

Всего было испытано 19 образцов бишофита из Волгоградского ПХГ, скважина №5т. Образцы изготавливались с соотношением высоты к диаметру $h/d=2/1$. При боковом давлении 1, 2, 3 и 4 МПа было испытано по три образца бишофита для каждого бокового давления, при боковом давлении 6 МПа было испытано 5 образцов бишофита.

3.4.1 Методика проведения испытаний

Производилась герметизация рабочей полости камеры путем удаления из нее воздуха. При помощи насоса высокого давления осуществлялась подача рабочей жидкости (масла) в камеру, затем происходило наблюдение за крапом, через который вытекает масло с пузырьками воздуха, как только пузырьков воздуха в масле не наблюдалось, вентиль перекрывался и считалось, что камера загерметизирована и подачей в нее рабочей жидкости доводилось боковое давление на образец до заданных значений.

Поддерживая постоянным выбранное значение бокового давления, образец нагружался вдоль оси до разрушения. Нагружение происходило по схеме Кармана $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, равномерно со скоростью 0,5 МПа/с, а поддерживаемое постоянным боковое напряжение составляло $\sigma_2=\sigma_3=\text{const}=1, 2, 3, 4$ и 6 МПа. В процессе проведения эксперимента происходила непрерывная регистрация измеряемых параметров (нагрузки и деформаций) с частотой измерения одна секунда. В реальном времени можно было наблюдать за тем, как образец нагружался и деформировался, т.к. частота обновления значений составляла 1 Гц. Разрушение фиксировалось по максимальному значению осевой нагрузки. Пример проведения эксперимента в реальном времени, по определению объемной прочности образца бишофита №7-2-2 представлен на рисунке 3.8.

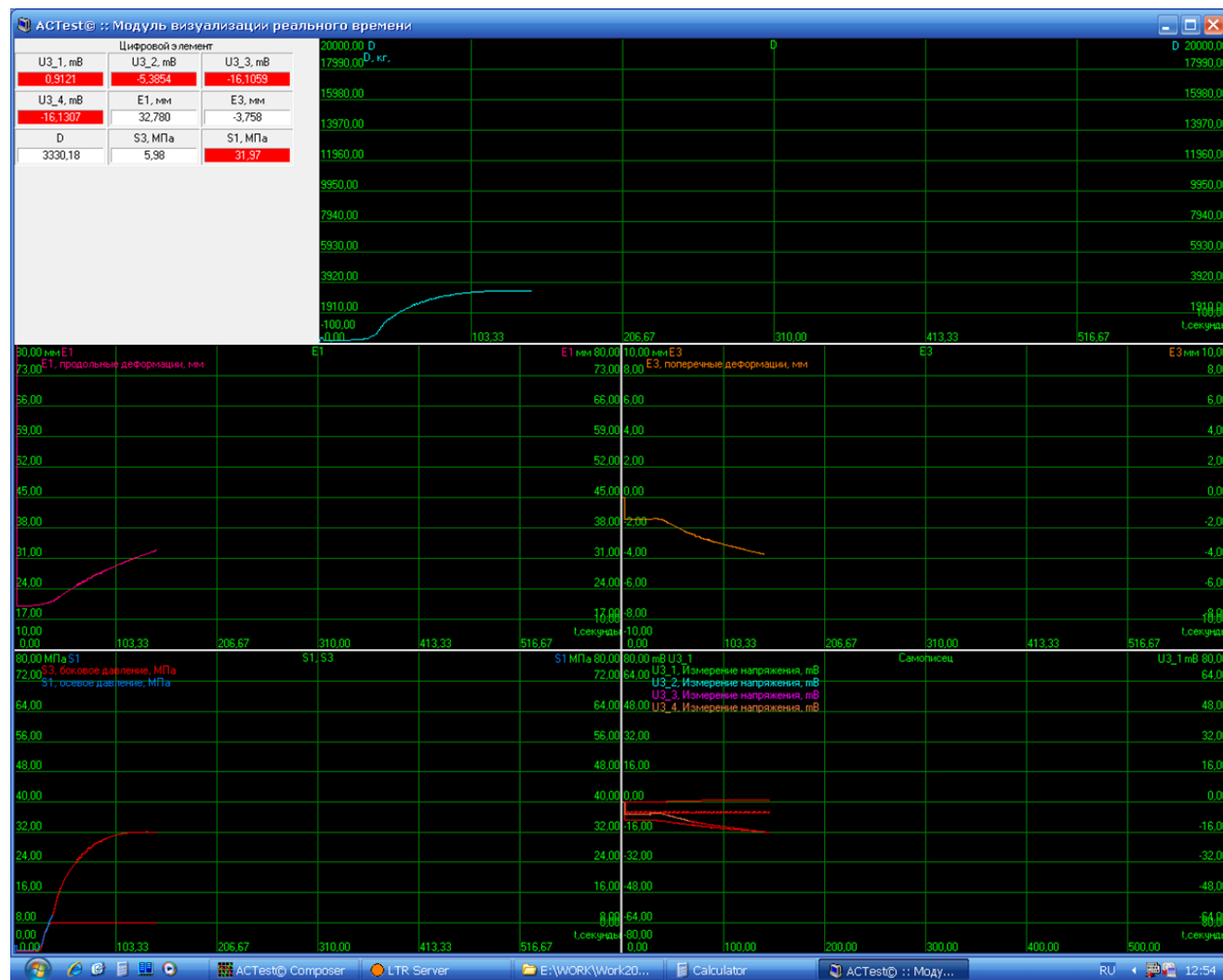
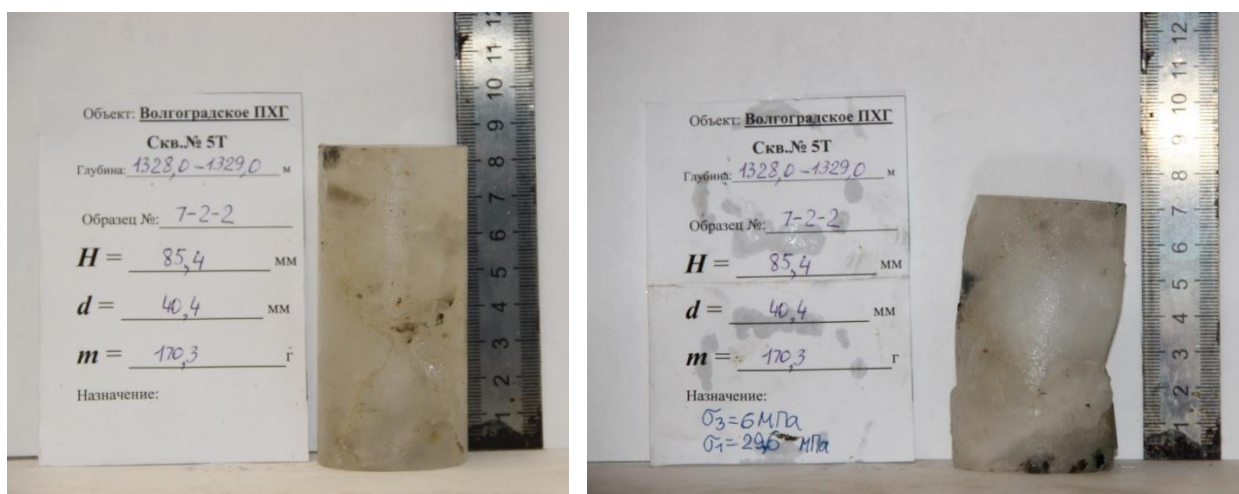


Рисунок 3.8 – Скриншот экрана компьютера в процессе проведения эксперимента в реальном времени по определению объемной прочности образца №7-2-2 при боковом давлении $\sigma_3=6\text{МПа}$

На рисунке 3.9 показан образец бишофита №7-2-2 до испытания и после испытания.



(а)

(б)

Рисунок 3.9 – Фотографии образца бишофита №7-2-2 до испытания (а) и после испытания (б)

3.4.2 Обработка полученных экспериментальных данных и построение паспорта прочности бишофитовой породы

3.4.2.1 Обработка полученных экспериментальных данных

После проведения экспериментов необходимо обработать полученные данные. Обработка полученных данных осуществлялась при помощи лицензионного программного комплекса STATISTICA.

Расчет продольной деформации образца ε_1 производится по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h} \quad (3.1)$$

где Δh – показания тензодатчиков на базе ИЧ-50, вычисляются по тарировочным уравнениям, мм;

h – начальная высота образца, мм.

Расчет поперечных деформаций образца ε_3 производится по формуле:

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta d}{d} \quad (3.2)$$

где Δd – показания кольцевого датчика, вычисляются по тарифовочному уравнению, мм;

d – начальный диаметр образца, мм.

Образец под нагрузкой от момента начала эксперимента и вплоть до достижения значения предела прочности при объемном сжатии непрерывно деформируется, а, следовательно, меняет площадь поперечного сечения. Нормативная документация, ГОСТ, согласно которому были проведены испытания, не учитывает этого, т.е. получается, что образец в процессе проведения эксперимента никак не деформируется, что не является таковым. Учет площади поперечного сечения образца бишофита позволил более точно вычислять осевое давление на образец.

Осевая нагрузка пересчитывается в осевое напряжение σ_1 образца по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{F \cdot g}{S \cdot (1 + \varepsilon_3)^2}, \text{ МПа} \quad (3.3)$$

где F – показания тензодинамометра, кг;

S – площадь поперечного сечения образца, мм²;

$(1 + \varepsilon_3)^2$ – значение, учитывающее изменение поперечного расширения образца, дол.ед.;

g – ускорение свободного падения, м/с².

3.4.2.2 Результаты испытания бишофитовой породы и сравнение их с каменной солью

После расчетов, которые были произведены по формулам (3.1 – 3.3), определялось максимальное напряжение, предел прочности при объемном сжатии, после достижения которого образец терял свою несущую способность. В таблице 3.7 показаны предельные осевые напряжения, при которых происходило разрушение образцов бишофита при заданных боковых давлениях. В таблице 3.7 также представлены элементы статистической обработки

полученных значений прочности по испытанным образцам. В таблице 3.8 показаны предельные осевые напряжения, при которых происходило разрушение образцов каменной соли при заданных боковых давлениях. В таблице 3.8 также представлены элементы статистической обработки полученных значений прочности по испытанным образцам. По результатам проведенных исследований строились полные диаграммы деформирования образцов бишофита и каменной соли. На рисунках 3.10 – 3.14 представлены полные диаграммы деформирования образцов бишофита при боковых давлениях, равных 1, 2, 3, 4 и 6 МПа. На рисунке 3.15 представлены полные диаграммы деформирования образцов каменной соли при боковом давлении 6 МПа.

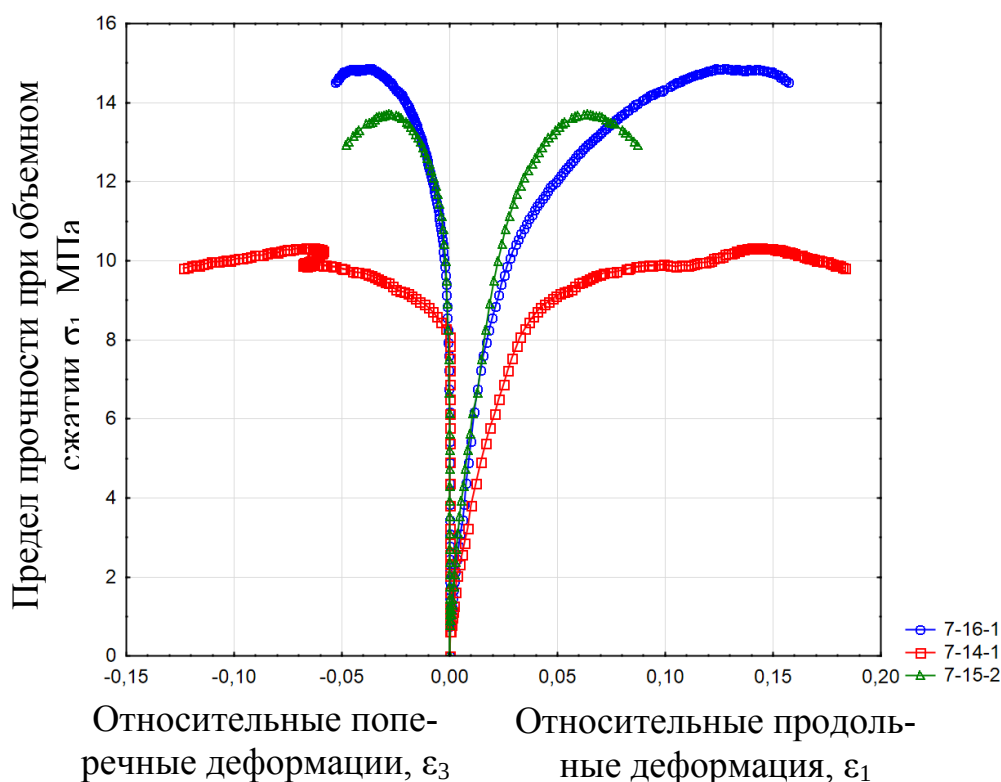


Рисунок 3.10 – Полные диаграммы деформирования образцов бишофита №7-16-1, №7-14-1 и №7-15-2 при $\sigma_3=1$ МПа

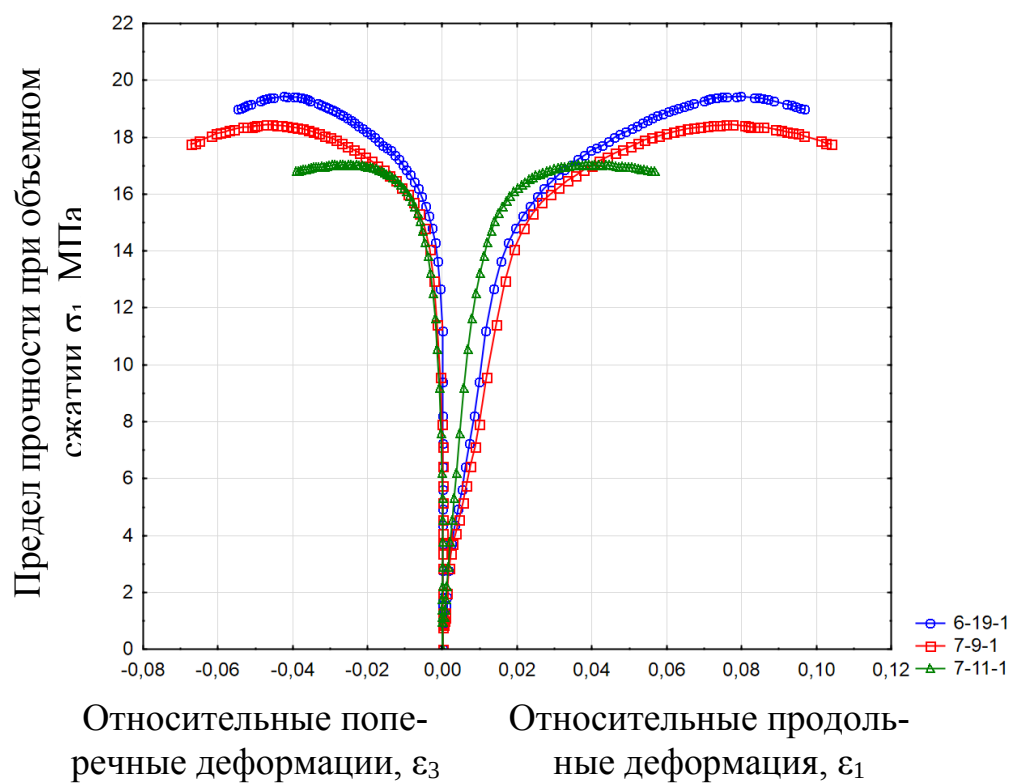


Рисунок 3.11 – Полные диаграммы деформирования образцов бишофита №6-19-1, №7-9-1 и №7-11-1 при $\sigma_3=2$ МПа

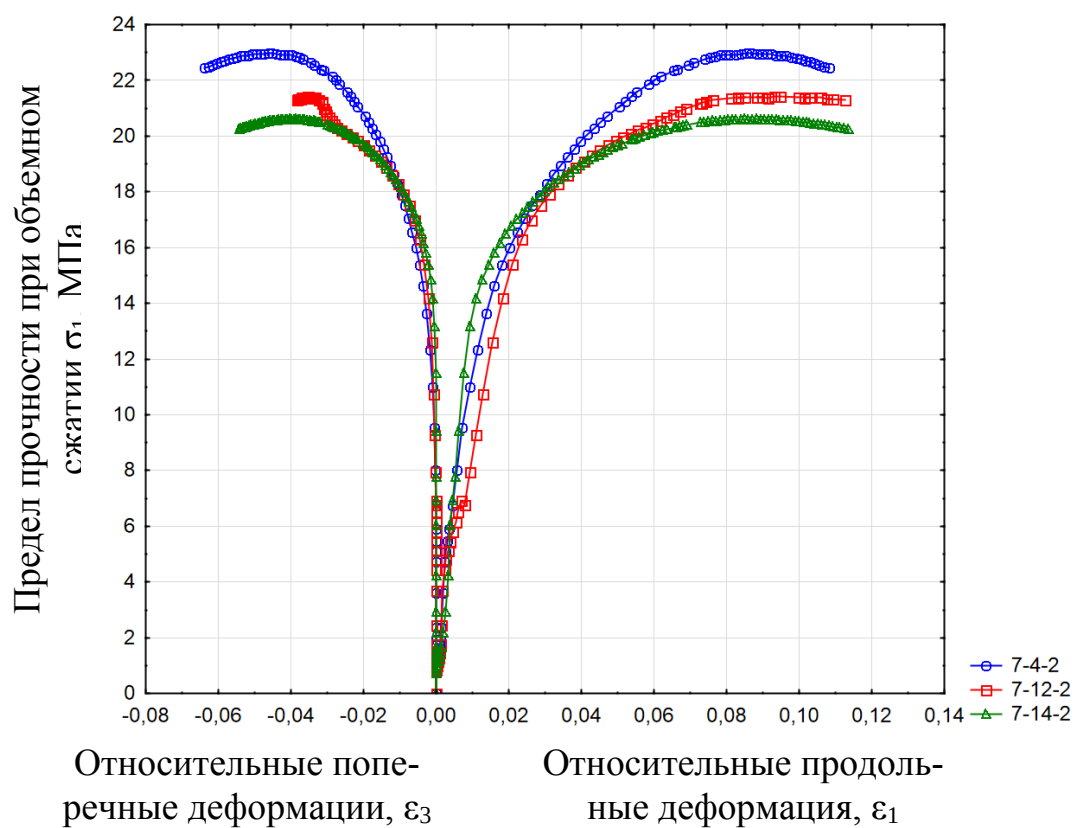


Рисунок 3.12 – Полные диаграммы деформирования образцов бишофита №7-4-2, №7-12-2 и №7-14-2 при $\sigma_3=3$ МПа

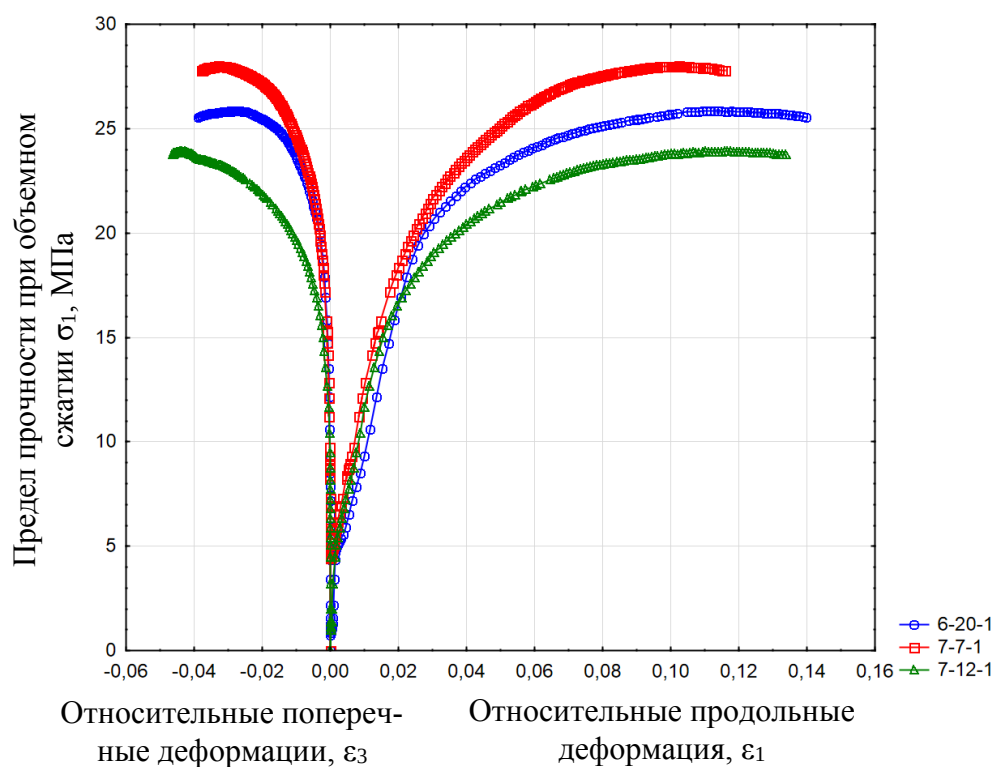


Рисунок 3.13 – Полные диаграммы деформирования образцов бишофита №6-20-1, №7-7-1 и №7-12-1 при $\sigma_3=4$ МПа

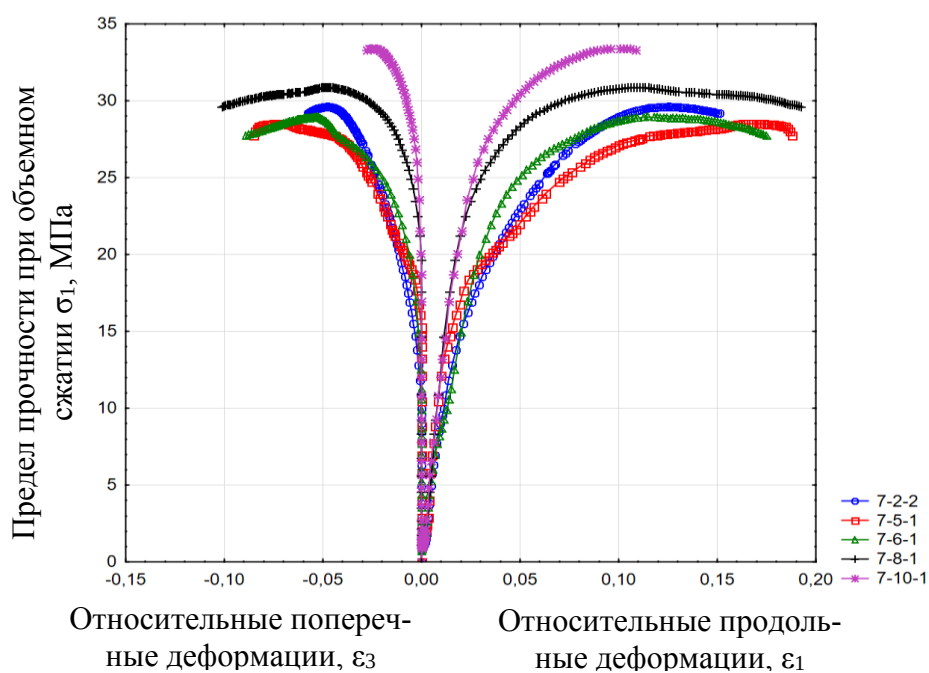


Рисунок 3.14 – Полные диаграммы деформирования образцов бишофита №7-2-2, №7-5-1, №7-6-1, №7-8-1 и №7-10-1 при $\sigma_3=6$ МПа

Для сравнения, также было испытано 15 образцов каменной соли из Волгоградского ПХГ скважины №8т с целью определения предела прочности при объемном сжатии.

Пример полных диаграмм деформирования образцов каменной соли при боковом давлении $\sigma_3=6$ МПа представлен на рисунке 3.15.

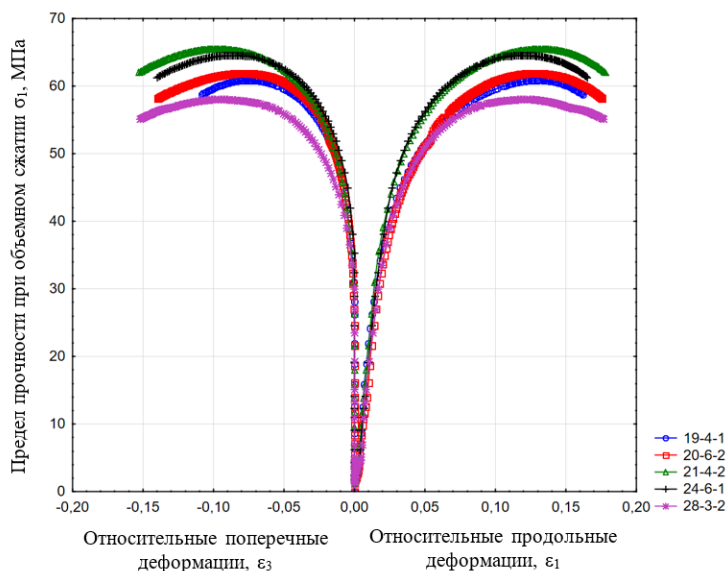


Рисунок 3.15 – Полные диаграммы деформирования образцов каменной соли при $\sigma_3=6$ МПа

Таблица 3.7 – Результаты определения предела прочности при объемном сжатии образцов бишофита

Номер образца	Боковое давление $\sigma_2=\sigma_3$, МПа	Предел прочности при объемном сжатии σ_1 , МПа	Среднее значение $\bar{\sigma}$, МПа	С.к.о. Δ , МПа	Коэффициент вариации V, %
7-14-1	1,0	10,3	13,0	2,4	18,4
7-15-2		13,7			
7-16-1		14,9			
6-19-1	2,0	19,4	18,3	1,2	6,6
7-9-1		18,5			
7-11-1		17,0			
7-4-2	3,0	23,0	21,7	1,2	5,6
7-12-2		21,4			
7-14-2		20,6			
6-20-1	4,0	25,9	25,9	2,1	7,9
7-7-1		28,0			
7-12-1		23,9			
7-2-2	6,0	29,6	30,5	1,8	5,8
7-5-1		29,4			
7-6-1		29,1			
7-8-1		30,9			
7-10-1		33,4			

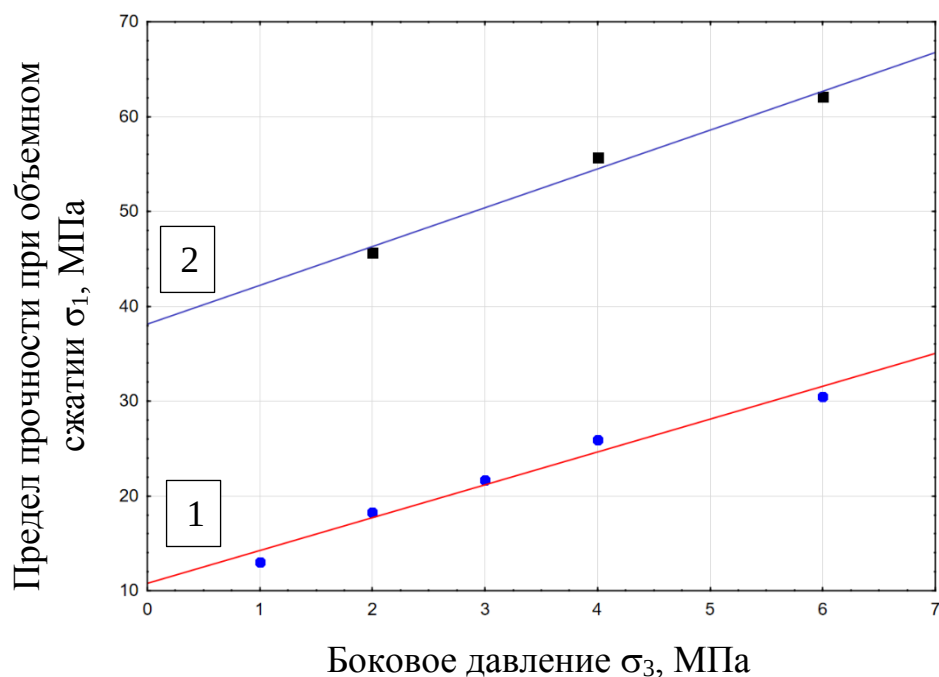
Как видно из рисунков 3.10 – 3.14 и таблицы 3.7 с увеличением бокового давления увеличивается и значение предела прочности при объемном сжатии образцов бишофита.

Таблица 3.8 – Результаты определения предела прочности при объемном сжатии образцов каменной соли

Номер образца	Боковое давление $\sigma_2=\sigma_3$, МПа	Предел прочности при объемном сжатии σ_1 , МПа	Среднее значение $\bar{\sigma}$, МПа	С.к.о. Δ , МПа	Коэффициент вариации V, %
22-8-2	2,0	46,3	45,7	1,0	2
22-8-3		45,8			
28-3-3		46,4			
29-4-3		46,2			
29-4-4		43,9			
17-9-2	4,0	56,2	55,7	1,5	3
21-4-1		53,5			
25-3-1		57,6			
26-7-1		55,3			
26-7-4		56,0			
19-4-1	6,0	60,9	62,1	3,0	5
20-6-2		61,9			
21-4-2		65,4			
24-6-1		64,5			
28-3-2		58,0			

Как видно из рисунка 3.15 и таблицы 3.8, с увеличением бокового давления увеличивается и значение предела прочности при объемном сжатии образцов каменной соли.

Ниже на рисунке 3.15 по данным таблицы 3.7 и 3.8 представлена 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 3.15 – 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 $\sigma_1 = 38,1 + 4,1 \cdot \sigma_3$.

3.4.2.3 Построение паспорта прочности образцов бишофита и каменной соли

Паспортом прочности горной породы является кривая, огибающая предельные круги напряжений Мора в координатах нормальных σ и касательных τ напряжений. Для построения паспорта прочности бишофита был использован лицензионный программный комплекс CorelDRAW X5. Программный комплекс CorelDRAW позволяет работать с векторной графикой, широко совместим с различными форматами, также в нем можно осуществлять подготовку графиков. К предельным кругам Мора проводится плавная огибающая при помощи кривых Безье, которые позволяет использовать программный комплекс. Основная ценность кривых Безье для построения паспорта прочности – в том, что, двигая точки (узлы), кривую можно менять так, чтобы она

проходила через узловые точки с определенными касательными в них. Построение паспорта прочности описано в статье [126].

Паспорт прочности, при его построении, должен соответствовать следующим критериям:

- криволинейная огибающая должна пересекать в области действия растягивающих напряжений координатную ось нормальных напряжений σ в точке σ_p под прямым углом, т.е. радиус кривизны такой огибающей в точке σ_p равен нулю;
- огибающая должна монотонно возрастать, должна быть замкнутой в области действия растягивающих напряжений, открытой в области сжатия, симметричной относительно оси нормальных напряжений σ ;
- производная огибающей по всему диапазону напряжений должна быть больше или равна нулю.

По совокупности парных значений $\sigma_1 = \sigma_{\max}$ и $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{\min}$ в координатах $\sigma - \tau$ строилось семейство полуокружностей радиусами $\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ с координатами центров $\sigma = (\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}; 0)$. К семейству полуокружностей, построенных по уравнениям выше, добавлялись полуокружности радиусами $\frac{\sigma_p}{2}$ и $\frac{\sigma_{сж}}{2}$ с координатами центров $(-\frac{\sigma_p}{2}; 0)$ и $(\frac{\sigma_{сж}}{2}; 0)$, где σ_p – предел прочности при одноосном растяжении; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии. Построенный паспорт прочности по Бишофиту представлен на рисунке 3.16, а для каменной соли на рисунке 3.17.

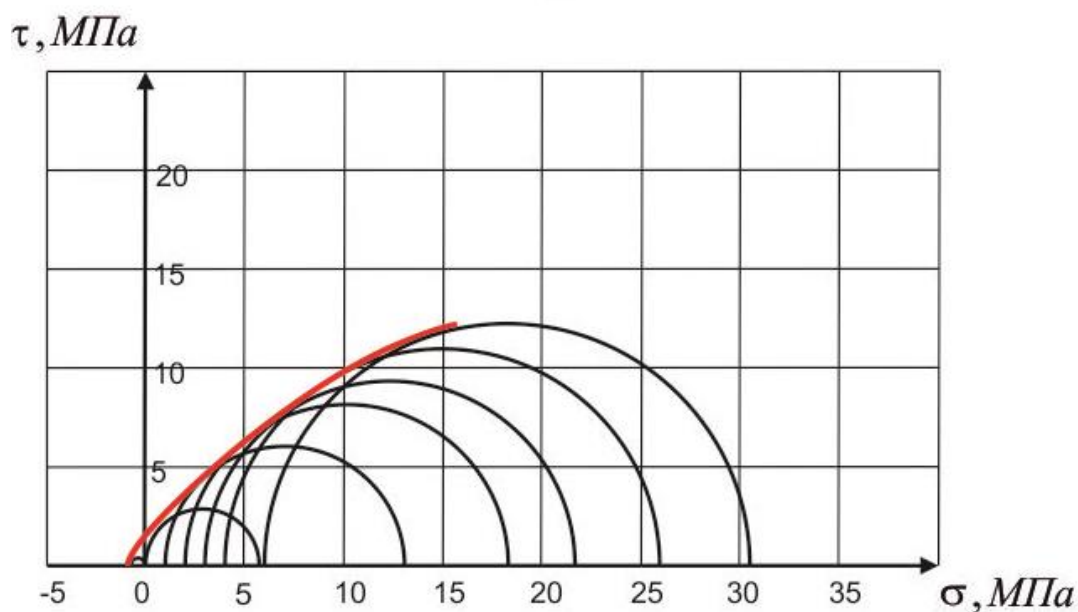


Рисунок 3.16 – Паспорт прочности и предельные круги Мора, построенные по результатам проведенных экспериментов на образцах бишофита из Волгоградского ПХГ, скважина №5т

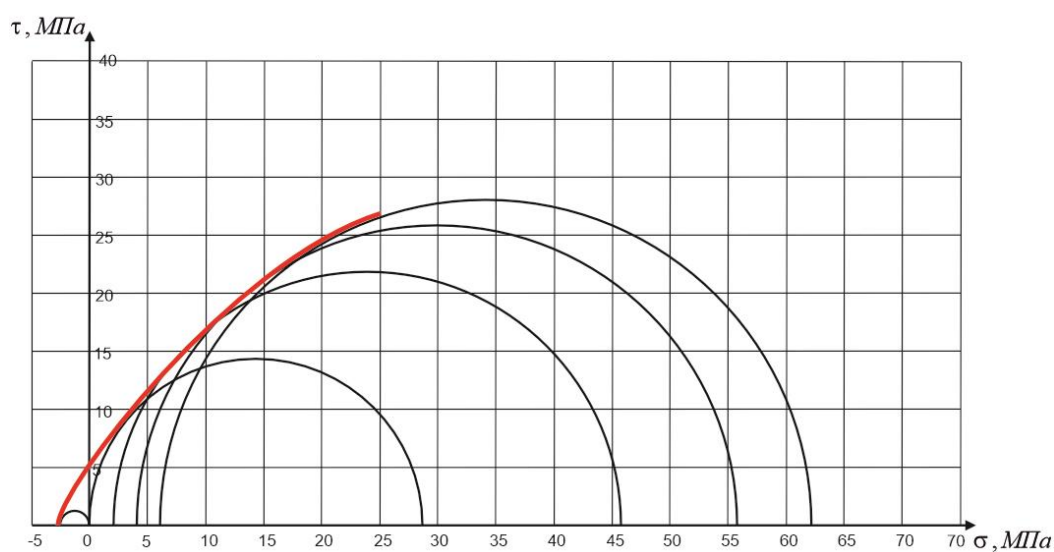


Рисунок 3.17 – Паспорт прочности и предельные круги Мора, построенные по результатам проведенных экспериментов на образцах каменной соли из Волгоградского ПХГ, скважина №8т

3.4.2.4 Определение основных параметров паспорта прочности, сцепления и угла внутреннего трения

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 коэффициентом 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. На рисунке 3.17 представлен паспорт прочности бишофита с выделенными наиболее характерными прямолинейными участками напряжений. На представленном рисунке также указаны все значения C и φ .

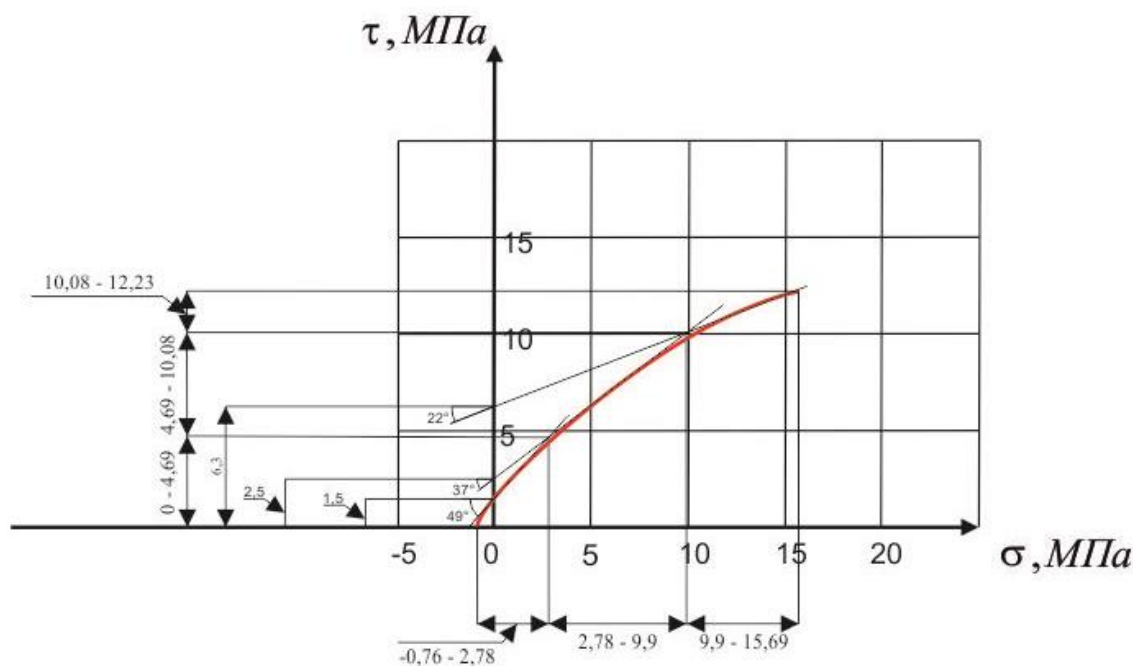


Рисунок 3.17 – Паспорт прочности бишофита с выделенными прямолинейными участками, для которых определены сцепление и угол внутреннего трения

На рисунке 3.18 представлен паспорт прочности каменной соли с выделенными наиболее характерными прямолинейными участками напряжений. На представленном рисунке также указаны все значения C и φ .

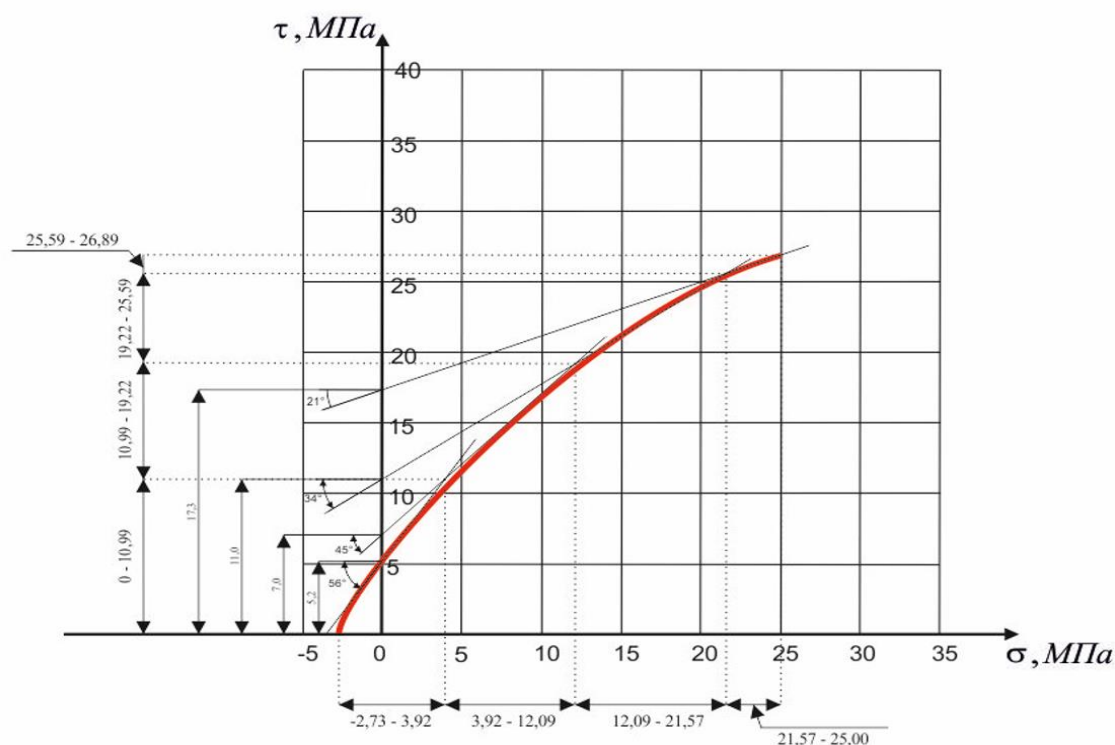


Рисунок 3.18 – Паспорт прочности каменной соли с выделенными прямолинейными участками, для которых определены сцепление и угол внутреннего трения

Для каждой группы граничные значения выделенных участков напряжений τ и σ переводились в значения главных напряжений σ_1 и $\sigma_2 = \sigma_3$ графическим методом следующим образом. В точках пересечения первой и второй огибающей, второй и третьей и т.д. проводились перпендикуляры к каждой из них. Значения σ , полученные путем пересечения перпендикуляров с осью нормальных напряжений записывались.

Полусумма полученных значений являлась центром круга, радиус которого равен расстоянию от точки с координатой (полусумма; 0) до пересечения исходных прямолинейных огибающих. Из определенных величин радиуса круга и координаты центра вычислялись значения осевых и боковых напряжений, которые и являлись граничными значениями рядом лежащих квазипрямолинейных участков, которые аппроксимировались прямыми.

В таблице 3.8 для образцов бишофита приведены граничные значения для каждого выделенного участка напряжений σ , τ , значения главных напряжений, а также суммы главных напряжений σ_v , значения сцепления и угла

внутреннего трения на данных участках. Сумма главных напряжений рассчитывалась по следующей формуле:

$$\sigma_v = \sigma_1 + 2\sigma_2, (\text{МПа}) \quad (3.4)$$

Таблица 3.8 – Граничные значения аппроксимации прямолинейных участков паспортов прочности образцов бишофита из Волгоградского ПХГ, скважина №5т

Участок	Касательное напряжение τ , МПа	Нормальное напряжение σ , МПа	Главные напряжения		Сумма главных напряжений σ_v , МПа	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , градусы
			$\sigma_2=\sigma_3$, МПа	σ_1 , МПа			
1	0-4,69	-0,76-2,78	0-0,81	-0,76-13,57	0-15,19	1,5	49
2	4,69-10,08	2,78-9,9	0,81-4,16	13,57-27,00	15,19-35,32	2,5	37
3	10,08-12,23	9,9-15,69	4,16-6,76	27,00-32,58	35,32-46,1	6,3	22

В таблице 3.9 для образцов каменной соли приведены граничные значения для каждого выделенного участка напряжений σ , τ , значения главных напряжений, а также суммы главных напряжений σ_v , значения сцепления и угла внутреннего трения на данных участках.

Таблица 3.9 – Граничные значения аппроксимации прямолинейных участков паспортов прочности образцов каменной соли из Волгоградского ПХГ, скважина №8т

Участок	Касательное напряжение τ , МПа	Нормальное напряжение σ , МПа	Главные напряжения		Сумма главных напряжений σ_v , МПа	Сцепление C , МПа	Угол внутреннего трения φ , градусы
			$\sigma_2=\sigma_3$, МПа	σ_1 , МПа			
1	0-10,99	-2,73-3,92	0-0,17	-2,73-34,83	0-35,17	5,2	56
2	10,99-19,22	3,92-12,09	0,17-3,18	34,83-53,00	35,17-59,36	7,0	45
3	19,22-25,59	12,09-21,57	3,18-6,30	53,00-63,92	59,36-76,52	11,0	34
4	25,59-26,89	21,57-25,00	6,30-6,47	63,92-63,95	76,52-76,89	17,3	21

Тем самым подтверждается второе научное положение.

Выводы по главе 3

Анализируя полученные экспериментальные данные определения прочностных и деформационных свойств бишофита, можно сделать следующие выводы:

1. Впервые в лабораторных условиях определены модуль деформации, модуль упругости, коэффициент Пуассона бишофита из Волгоградского ПХГ.

2. Исследования по определению деформационных характеристик бишофитовой породы показали, что нормативные документы не подходят для определения вышеперечисленных параметров, данные, которые получаются в этом случае при обработке результатов являются некорректными.

3. Образцы каменной соли и бишофита показали существенные отличия кривых деформирования и упругих свойств, обусловленные реологическими и пластическими свойствами последнего. Средние значения модуля деформаций и модуля упругости каменной соли выше этих свойств у бишофита в 4,24 и 6,77 раз соответственно, а коэффициент Пуассона у бишофита выше в 1,81 раза, чем у каменной соли, что должно быть учтено при проектировании скважин и подземных сооружений.

4. Впервые определены прочностные свойства бишофита. Получены прочности при объемном сжатии, построен паспорт прочности, графическим путем определены сцепление и угол внутреннего трения в зависимости от напряженного состояния образца.

4 Экспериментальное определение реологических свойств бишофитовой породы в режиме одноосного ступенчатого нагружения

4.1 Образцы для проведения испытаний

Перед началом экспериментов образцы бишофита упаковывались в резиновую оболочку толщиной 0,1 мм, с помощью которой был исключен контакт образца с внешней средой при испытании в машине нагружения. Пример некоторых изготовленных образцов бишофита из скважины №8т Волгоградского ПХГ с глубин 1328,0 м – 1334,0 м для проведения испытаний представлен на рисунке 4.1.

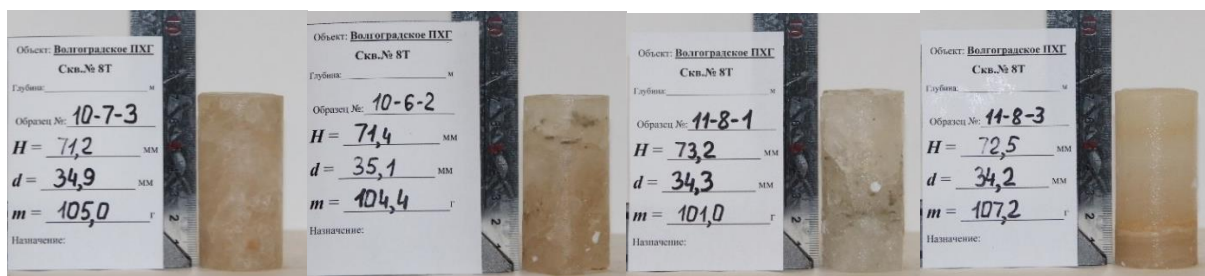


Рисунок 4.1 – Пример изготовленных образцов бишофита из скважины 8т Волгоградского ПХГ для проведения реологических испытаний

Было изготовлено 15 цилиндрических образцов бишофита с соотношением высоты к диаметру 2:1. Высота образцов бишофита изменялась от 71,0 до 74,0 мм и диаметр от 34,0 до 36,0 мм. У всех образцов определялась масса и геометрические размеры, а также плотность. Среднее значение плотности составило 1,56 г/см³.

Были также проведены сравнительные исследования на образцах каменной соли из скважины №8т Волгоградского ПХГ с глубин 1405,0 – 1415,0 м. Химический анализ исследуемых образцов каменной соли показал содержание NaCl более 90%. Химический состав по всем образцам показал полную идентичность, что дало основание для их испытаний в одной группе.

В [127, 128] рассмотрены свойства бишофитовой породы при одноосном ступенчатом нагружении.

4.2 Методика проведения испытаний

Предварительно по 12 образцам бишофита определялся мгновенный предел прочности при одноосном сжатии, среднее значение которого, по результатам испытаний, согласно таблице 3.1, составило 5,9 МПа. Первоначально планировалось 12 ступеней одноосного нагружения для каждого образца. Такое сравнительно большое количество ступеней было выбрано для возможности детально изучить все стадии ползучести образца во времени под нагрузкой. Исходя из этого, 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.

Температура и влажность при проведении испытаний соответствовала нормальным условиям.

Для сравнения были проведены испытания на ползучесть образцов каменной соли. Методика испытаний образцов каменной соли, имеющей большую прочность, была идентична методике испытаний образцов бишофита, за тем исключением, что при среднем значении предела прочности 25 МПа шаг увеличения напряжений составлял 5 МПа. Это обеспечило равенство ступеней нагружения каменной соли и бишофита в относительных единицах и дало возможность наглядно показать их отличие при деформировании.

4.2 Результаты

На рисунке 4.2 в качестве примера приведен график ступенчатого нагружения образца бишофита 10-6-2 вплоть до его разрушения, т.е. перехода на конечную стадию прогрессирующей ползучести.

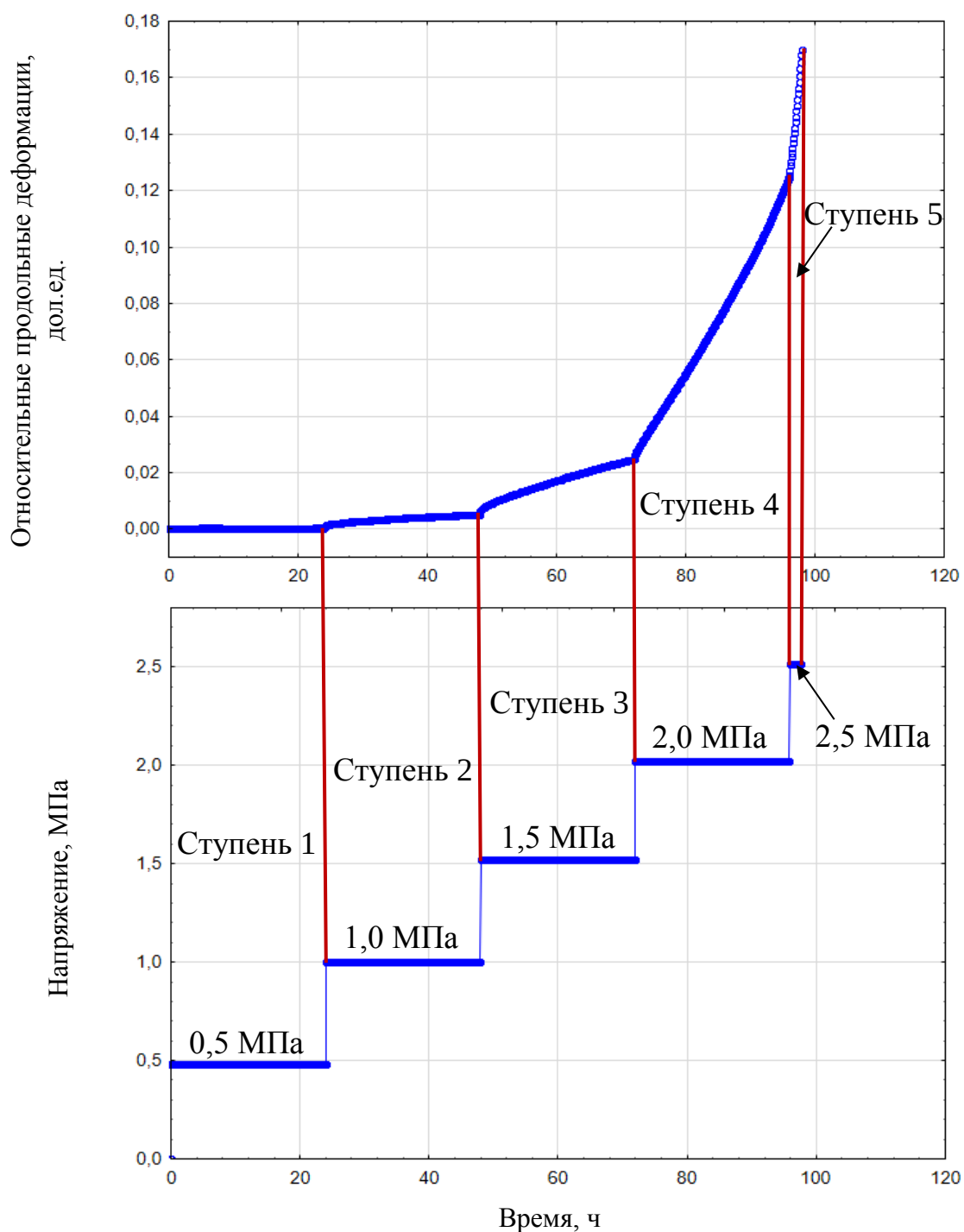


Рисунок 4.2 – Ступенчатое нагружение образца бишофита 10-6-2 (рисунок снизу) и кривые его ползучести (рисунок сверху)

На рисунке 4.3 приведен график ступенчатого нагружения образца каменной соли вплоть до его разрушения, т.е. перехода на конечную стадию прогрессирующей ползучести.

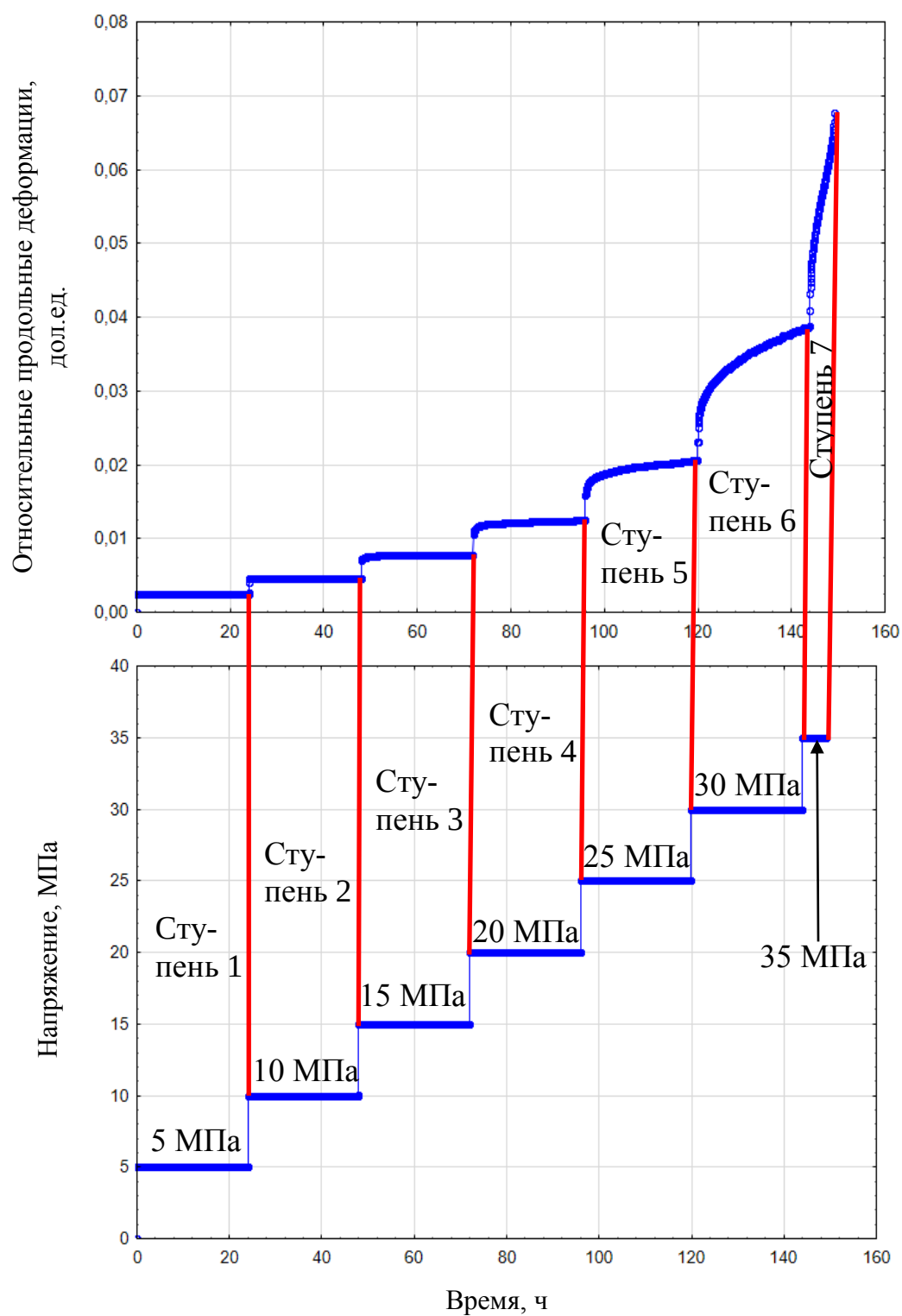


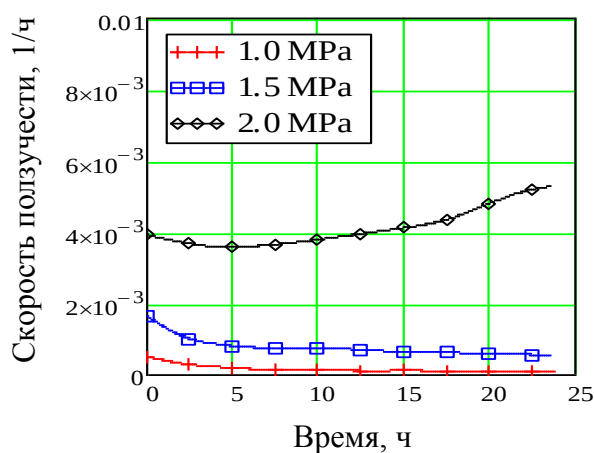
Рисунок 4.3 – Ступенчатое нагружение образца каменной соли 36-9-2 (рисунок снизу) и кривые его ползучести (рисунок сверху)

Следует отметить, что количество ступеней нагружения до разрушения у каменной соли было больше, чем у бишофита.

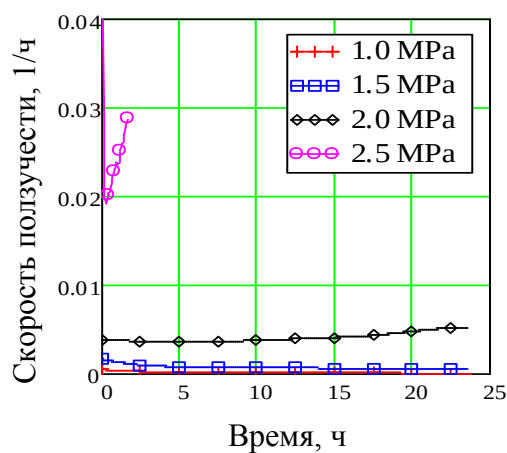
4.3 Анализ результатов

4.3.1 Анализ результатов испытаний образцов бишофитовой породы

Для описания ползучести как бишофита, так и каменной соли использовались структурные феноменологические реологические модели, которые представляли собой комбинации упругого, вязкого и пластического элементов. Их комбинация позволяла описывать упругое деформирование, а также затухающую и установившуюся ползучести. Описание прогрессирующей ползучести рассмотрено ниже. Для определения вида ползучести на каждой ступени рассчитывались скорости деформирования. Расчеты производились в среде Mathcad по специально написанным программам. На рисунке 4.4(а) в увеличенном масштабе показаны графики изменения скорости ползучести образца бишофита 10-6-2 на второй, третьей и четвертой ступенях. Первая ступень на рисунке отсутствует по той причине, что при действующем напряжении на ней 0,5 МПа в образце не возникло никаких реологических процессов и скорость деформирования была равна нулю. Пятой ступени на рисунке 4.4 (а) нет из-за резко возросшей скорости ползучести, что в конечном итоге привело к разрушению образца. На рисунке 4.4 (б) отдельно показана 5 ступень со всеми остальными ступенями.



(а)



(б)

Рисунок 4.4 – Графики скоростей ползучести образца бишофита 10-6-2 без пятой ступени (а) и с пятой ступенью (б)

Как упоминалось выше, на первой ступени под действием напряжения, равным 0,5 МПа, скорость ползучести образца бишофита незначительна. На второй ступени под действием напряжения 1,0 МПа скорость продольного деформирования образца уменьшалась, что характерно для затухающей ползучести. На третьей ступени при напряжении 1,5 МПа скорость продольного деформирования к концу ступени менялась незначительно, что характерно для установившейся ползучести. На четвертой ступени при напряжении 2,0 МПа произошел резкий рост скорости деформации бишофита и начался переход из установившейся ползучести в прогрессирующее течение. На пятой ступени, также, как и на четвертой, произошел резкий рост скорости деформирования образца, вызванный увеличением напряжения до 2,5 МПа, что в течение двух часов привело к разрушению образца.

Разрушение у образцов происходило после отчетливого проявления прогрессирующей ползучести, у одних образцов на 4 ступени, а у других - на 5 ступени.

4.3.2 Построение феноменологических моделей и определение их параметров для образцов бишофитовой породы

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. Эквивалентная схема, иллюстрирующая различные виды деформирования и ползучести, представлена на рисунке 4.5. Обозначения элементов схемы будут использоваться ниже в формулах. Рассмотрим особенности кривых ползучести образца на каждой ступени с соответствующим описанием вида ползучести. Модель представлена в виде суммы математических выражений, описывающих упругое деформирование, а также затухающую, установившуюся и прогрессирующую ползучести.

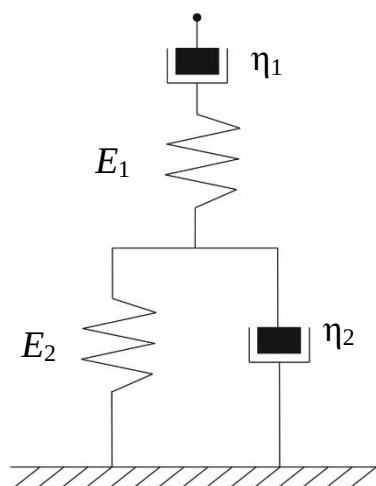


Рисунок 4.5 – Упруго-вязкая модель образца бишофита

На первой ступени после приложения на образец напряжения 0,5 МПа деформации ползучести отсутствовали, модель имела вид упругого элемента Максвелла, описываемого законом Гука

$$\varepsilon_e(\sigma) = \frac{\sigma}{E_1} \quad (4.1)$$

где ε_e – упругая деформация, σ – напряжения, E_1 – первый параметр упругости модели образца бишофита.

На второй ступени при напряжении на образце бишофита 1,0 МПа кроме упругого деформирования, характерного для первой ступени, отчетливо проявилась затухающая ползучесть. Данная ступень хорошо описывается упруго-вязкой компаунд-моделью Бюргерса, которая объединяет модели Максвелла и Кельвина-Фойгта и описывается уравнением

$$\varepsilon(t, \sigma) = \frac{\sigma}{E_1} + \left(\frac{\sigma}{E_2} - \frac{\sigma}{E_1} \right) \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \quad (4.2)$$

где η_2 – второй параметр вязкости модели, E_2 – второй параметр упругости модели, характеризующий соотношение упругой деформации и деформации затухающей ползучести образца бишофита. Совместно с параметром вязкости он характеризует затухающую ползучесть. Отношение $\eta_2/E_2 = \tau_2$ имеет размерность времени и характеризует время изменения деформации затухающей ползучести в e раз.

На третьей ступени при напряжении 1,5 МПа к затухающей ползучести добавляется установившаяся ползучесть, которая выражается в увеличении деформаций с постоянной скоростью. Данная ступень также, как и вторая, хорошо поддается описанию с добавлением параметра вязкости η_1 модели Бюргера.

$$\varepsilon(t, \sigma) = \frac{\sigma}{E_1} + \left(\frac{\sigma}{E_2} - \frac{\sigma}{E_1} \right) \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) + \left(\frac{\sigma}{\eta_1} \right) t \quad (4.3)$$

где η_1 – первый параметр вязкости модели, характеризующий установившуюся ползучесть.

На четвертой ступени при напряжении 2,0 МПа скорость деформирования после некоторого снижения на участке от 0 до 5 часов начала возрастать, что можно видеть на рисунке 4.4(а). Данное увеличение обусловлено проявлением прогрессирующей ползучести.

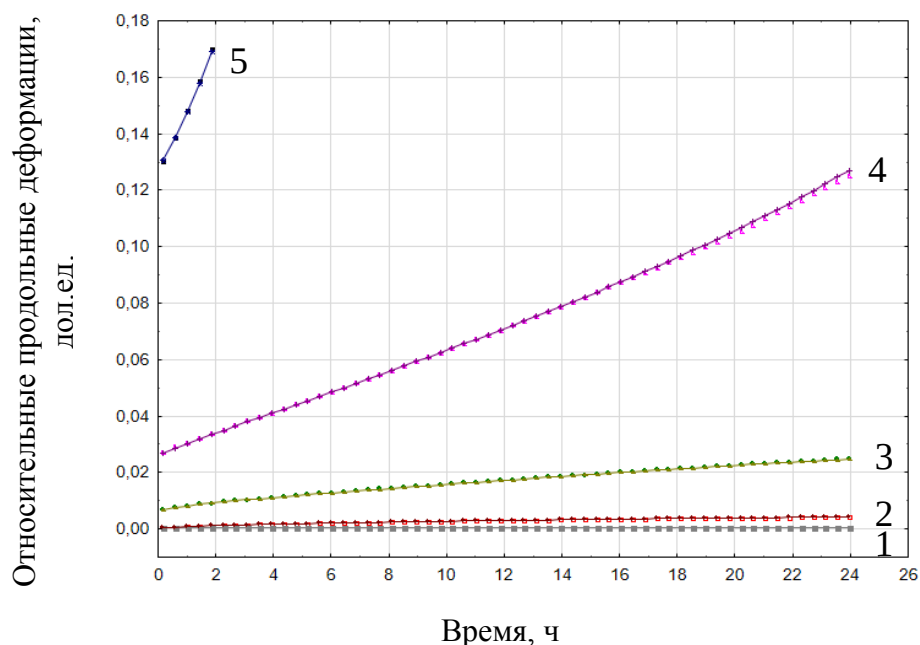
В схеме на рисунке 4.5 отсутствует элемент для описания прогрессирующей ползучести, поэтому для ее описания была использована математическая запись экспоненты в последнем слагаемом в формуле (4.4), описывающей все стадии ползучести.

$$\varepsilon(t, \sigma) = \frac{\sigma}{E_1} + \left(\frac{\sigma}{E_2} - \frac{\sigma}{E_1} \right) \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) + \left(\frac{\sigma}{\eta_1} \right) t + \left(\frac{\sigma}{E_3} - \frac{\sigma}{E_1} \right) \left(e^{\frac{t}{\tau_3} - 1} \right) \quad (4.4)$$

где E_3 – третий параметр упругости модели, характеризующий влияние прогрессирующей ползучести, τ_3 – параметр возрастания деформаций прогрессирующей ползучести.

На пятой ступени при напряжении 2,5 МПа из-за резкого роста скорости деформирования, который начался еще на середине четвертой ступени, образец бишофита в течение двух часов разрушился.

Формула (4.4) хорошо описывает деформирование образца на всех ступенях нагружения, что видно из рисунка 4.6, где в виде точек представлены экспериментальные данные, а в виде линий – аппроксимирующие их кривые в соответствии с формулой (4.4).



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

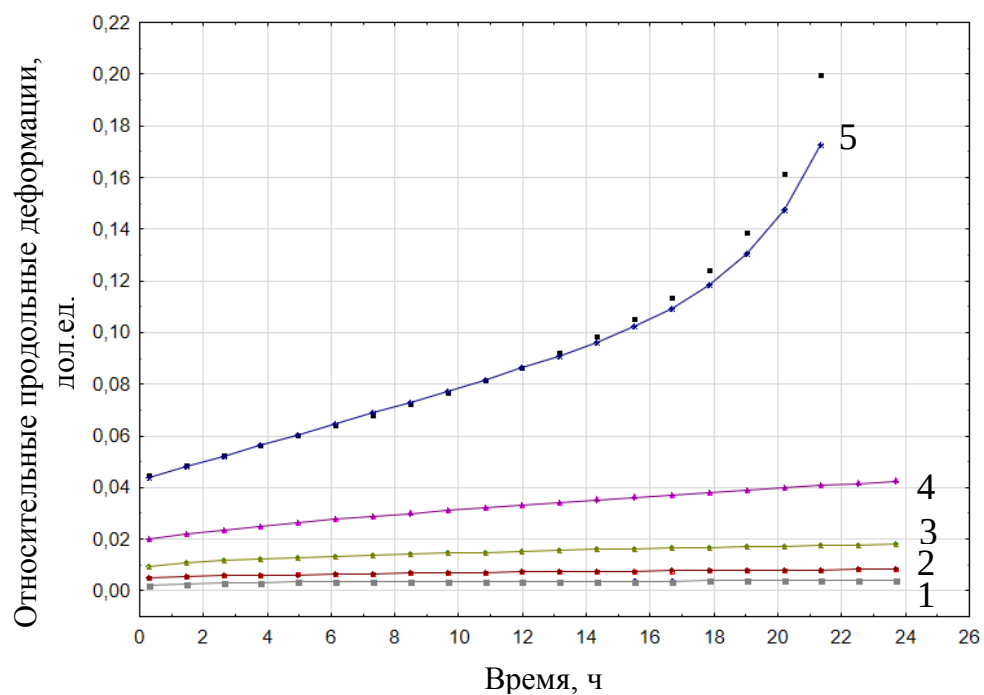
Рисунок 4.6 – Экспериментальные кривые ползучести образца 10-6-2: фигурные точки – экспериментальные данные; сплошные линии – результат аппроксимации по формуле (4.4)

Ниже на рисунках 4.7 – 4.9 представлены аналогичные графики ползучести для образцов 10-7-3, 11-8-1, 11-8-3, показывающие похожие зависимости.

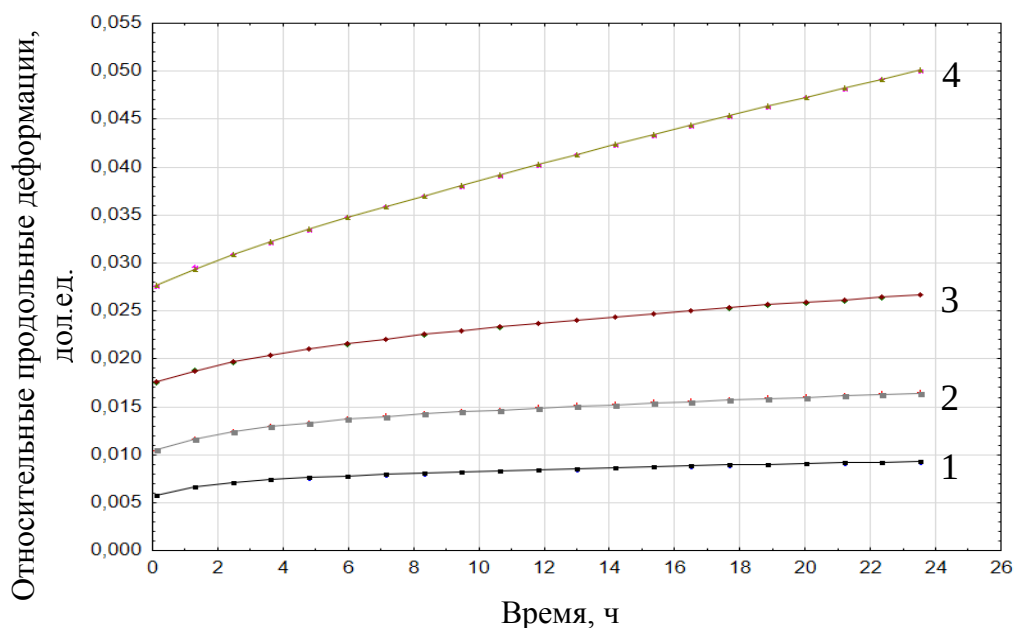
В таблице 4.1, в качестве примера, приведены параметры упругости и параметры вязкости регрессионной модели в соответствии с формулой (4.4), при помощи которой производилась обработка экспериментальных данных образца 10-6-2.

Таблица 4.1. Зависимости коэффициентов регрессионной модели (4.4) от напряжений на ступенях для образца бишофита 10-6-2

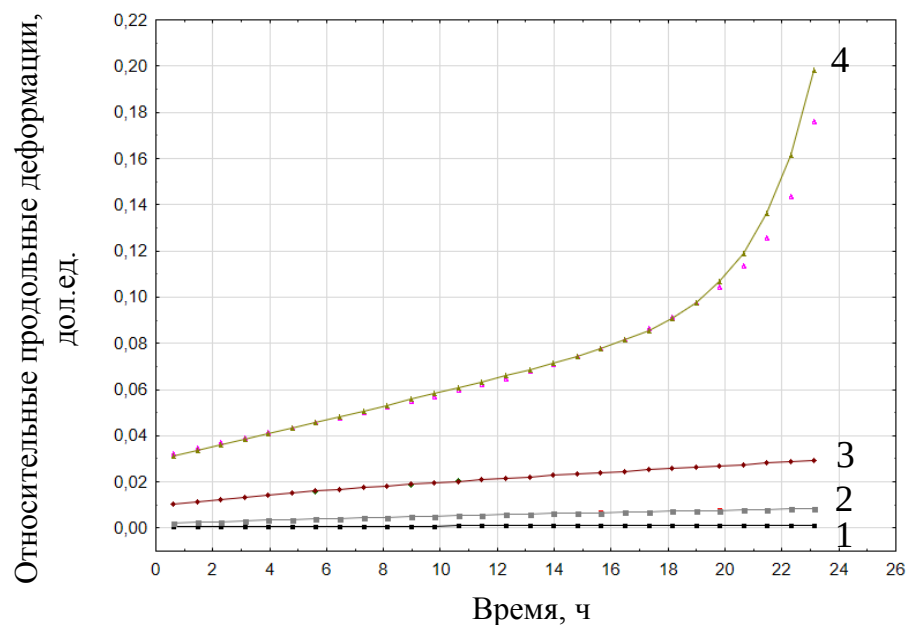
Номер ступени	Напряжение на ступени σ , МПа	Параметры упругости модели E , МПа			Параметры вязкости модели η , МПа·ч		Постоянная времени τ , ч	
		E_1	E_2	E_3	η_1	η_2	τ_2	τ_3
1	0,5	1610	1610	98941000	8046600	40100	4998	16554
2	1,0	4001	888	67225000	5397	1641	1,9	12,9
3	1,5	244	193	5000000	1432	194	1	27,7
4	2,0	79	75	77	588	33	0,44	7,2
5	2,5	20	19,8	13,5	337	0,11	0,006	3,6



1 – 0,5 МПа; 2 – 1,0 МПа, 3 – 1,5 МПа, 4 – 2,0 МПа, 5 – 2,5 МПа
 Рисунок 4.7 – Экспериментальные кривые ползучести образца 10-7-3: фигурные точки – экспериментальные данные; сплошные линии – результат аппроксимации по формуле (4.4)



1 – 0,5 МПа; 2 – 1,0 МПа, 3 – 1,5 МПа, 4 – 2,0 МПа
 Рисунок 4.8 – Экспериментальные кривые ползучести образца 11-8-1: фигурные точки – экспериментальные данные; сплошные линии – результат аппроксимации по формуле (4.4)



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

Рисунок 4.9 – Экспериментальные кривые ползучести образца 11-8-3: фигурные точки – экспериментальные данные; сплошные линии – результат аппроксимации по формуле (4.4)

Необходимо отметить, что по всем испытанным образцам бишофита значения параметров упругости модели, параметров вязкости модели и постоянной времени τ_3 уменьшаются с проявлением той или иной стадии ползучести, характерной для данной ступени, что можно наблюдать на примере образца бишофита 11-8-3 на рисунке 4.10 и в таблице 4.2. Если значение какого-то из параметров чрезмерно 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 очень большое время. По всем испытанным образцам общая тенденция такая, что с увеличением напряжения на ступени значения параметров упругости модели, параметров вязкости модели и постоянной времени τ_3 уменьшаются.

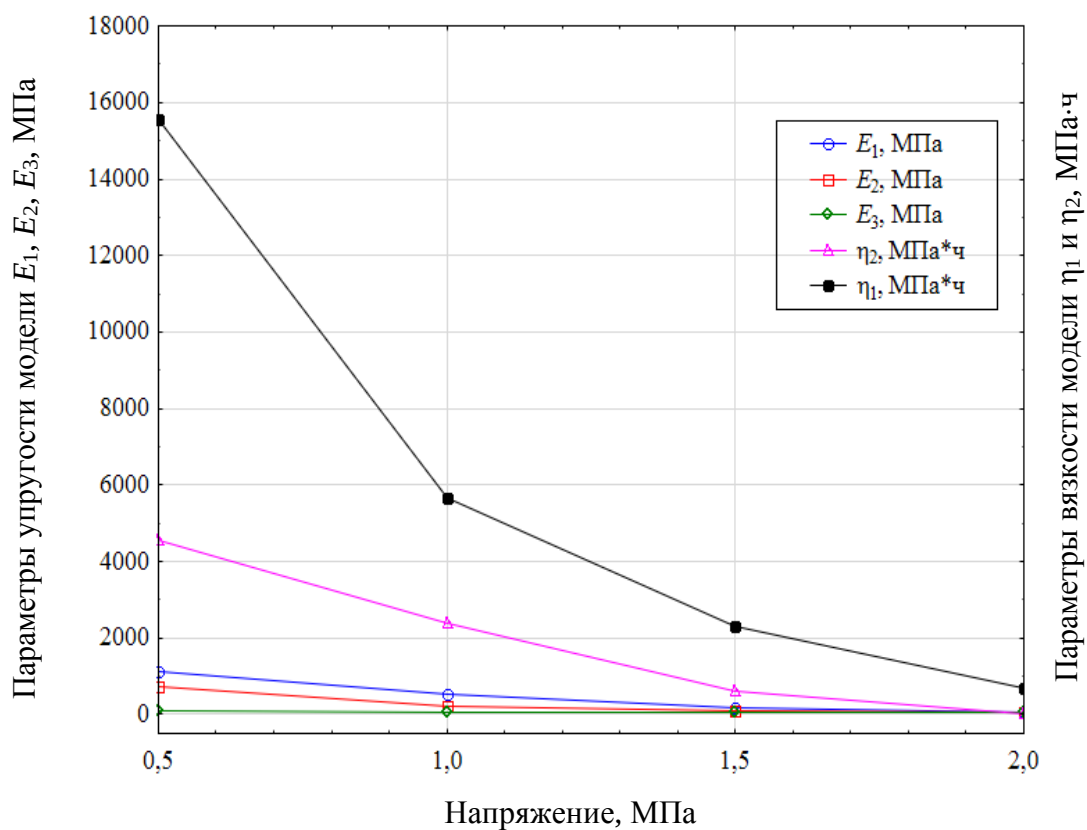


Рисунок 4.10 – Зависимость параметров упругости и параметров вязкости модели образца бишофита 11-8-3 от осевого напряжения

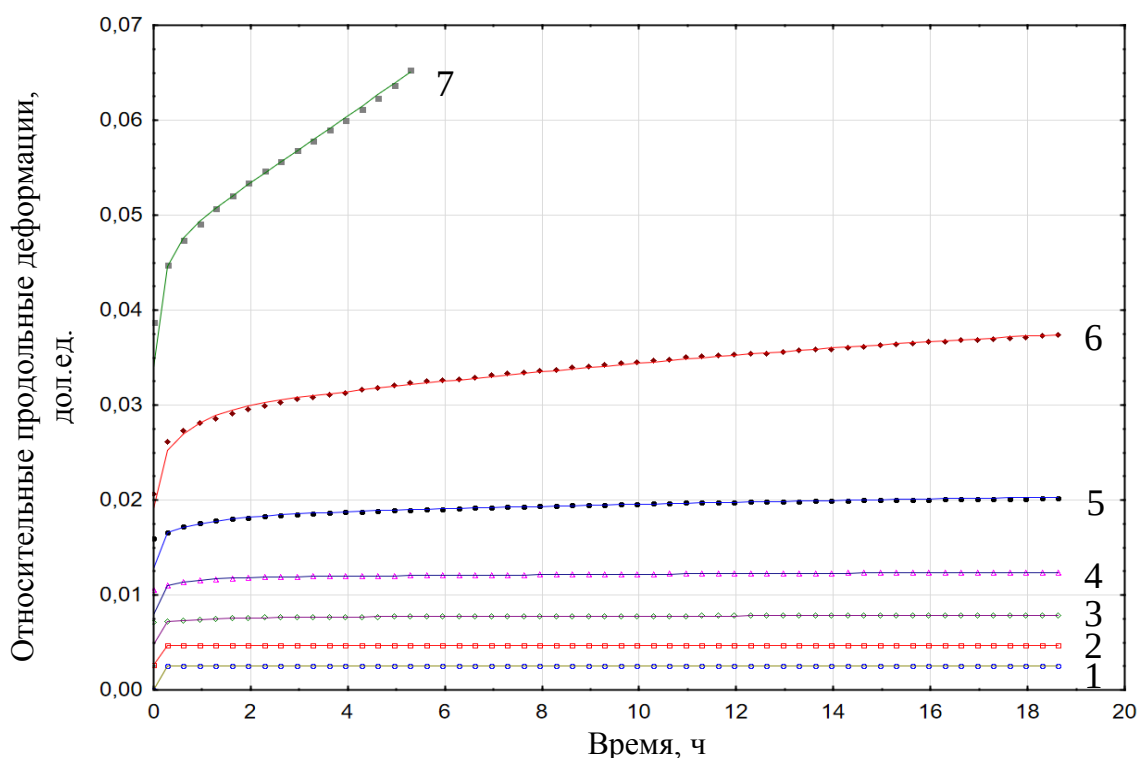
Таблица 4.2 – Зависимость постоянных времени τ_2 и τ_3 от напряжений на ступенях для образца 11-8-3

Номер ступени	Напряжение на ступени σ , МПа	Постоянная времени τ , ч	
		τ_2	τ_3
1	0,5	6,1	9409
2	1,0	10,3	4774
3	1,5	5,6	5357
4	2,0	0,00044	2

Была проведена статистическая обработка полученных результатов по формуле (4.4) и для других образцов. По всем испытанным образцам бишофита коэффициент детерминации R^2 составлял не менее 0,9938, коэффициент вариации не превышал 1,85%. Это говорит о том, что формула (4.4) удовлетворительно описывает кривые ползучести бишофита, что можно наблюдать на рисунках 4.7 – 4.9, где экспериментальные и модельные значения либо совпадают, либо близки друг к другу.

4.3.3 Анализ результатов испытаний образца каменной соли

На рисунке 4.11 приведены графики экспериментальных кривых ползучести и результаты аппроксимации по формуле (4.4) ступенчатого нагружения образца каменной соли 36-9-1 вплоть до его разрушения, т.е. перехода в прогрессирующую ползучесть.



1 – 5,0 МПа; 2 – 10,0 МПа, 3 – 15,0 МПа, 4 – 20,0 МПа, 5 – 25,0 МПа,
6 – 30,0 МПа, 7 – 35,0 МПа

Рисунок 4.11 – Кривые ползучести образца каменной соли 36-9-2: фигурные точки – экспериментальные данные; сплошные линии – результат аппроксимации по формуле (4.4)

Ниже на рисунке 4.12 приведены графики скоростей ползучести образца каменной соли 36-9-2 в зависимости от номера ступени и приложенного напряжения. На рисунке 4.12 не показаны первые две ступени скорости деформации ползучести, т. к. они значительно меньше упругих деформаций, а их графики сливаются с осью абсцисс.

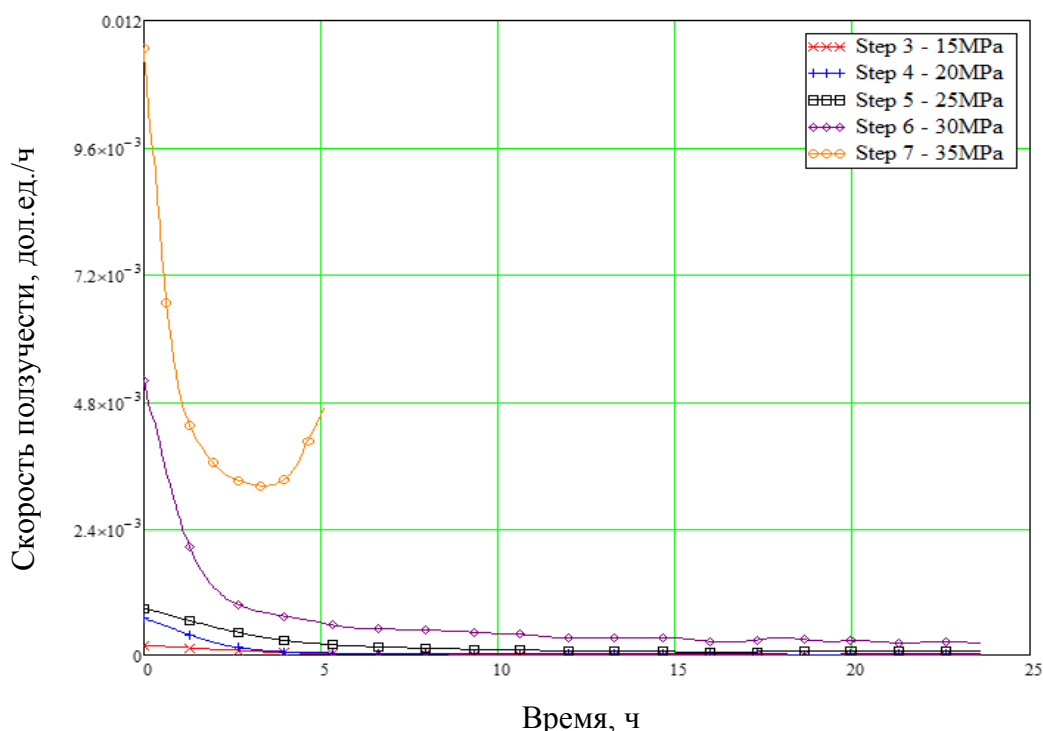


Рисунок 4.12 – Скорости ползучести образца каменной соли 36-9-2 на каждой ступени

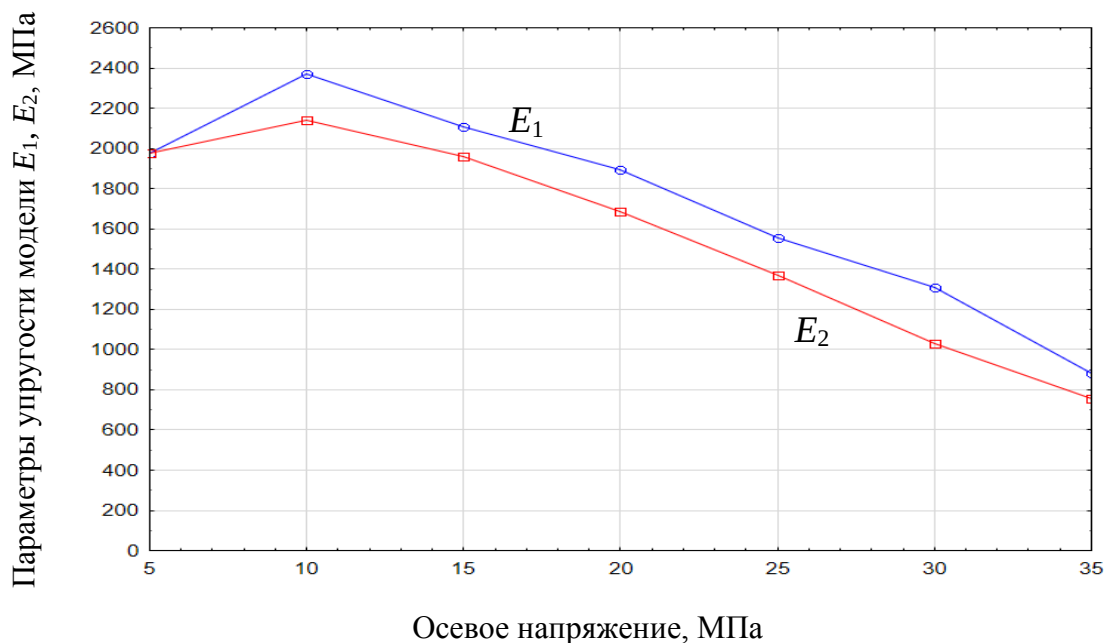
Из рисунка 4.11 видно, что на первой ступени при напряжении 5 МПа, отсутствуют какие-либо проявления реологических процессов на образце каменной соли. На второй ступени при напряжении 10 МПа проявилась слабо выраженная затухающая ползучесть. На третьей, четвертой и пятой ступенях при напряжениях 15, 20, 25 МПа скорости деформирования уменьшались, что характерно для затухающей ползучести. На шестой ступени при напряжении 30 МПа скорость деформирования практически стала постоянной, что характерно для установившейся ползучести. На седьмой ступени при напряжении 35 МПа произошел резкий рост скорости деформирования, что через 5,5 часов привело к разрушению образца.

В таблице 4.3 приведены параметры упругости и параметры вязкости модели, которые входят в формулу (4.4), при помощи которой производилась обработка экспериментальных данных образца 36-9-2.

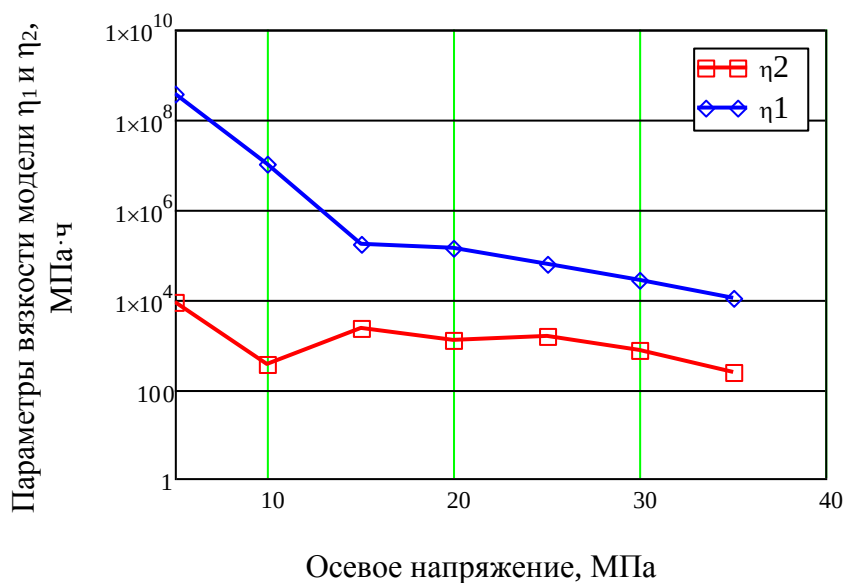
Таблица 4.3 – Зависимости коэффициентов регрессионной модели (4.4) от напряжений на ступенях для образца каменной соли 36-9-2

Номер ступени	Напряжение на ступени σ , МПа	Параметры упругости модели E , МПа			Параметры вязкости модели η , МПа·ч		Постоянная времени τ , ч	
		E_1	E_2	E_3	η_1	η_2	τ_2	τ_3
1	5	1978	1978	1380000	362000000	8817	4,46	182765
2	10	2369	2141	150000000	10300000	345	0,16	3839
3	15	2110	1960	10500000	174541	2178	1,11	102
4	20	1897	1689	95000000	131758	1200	0,71	95
5	25	1558	1369	1130000000	61469	1459	1,07	63
6	30	1307	1030	7180000000	25002	711	0,69	39
7	35	883	755	15496	9917	240	0,32	0

Также, как и в случае с образцами бишофита, значения параметров упругости модели, параметров вязкости модели и постоянной времени уменьшаются с проявлением той или иной стадии ползучести, характерной для данной ступени, что на примере образца каменной соли 36-9-2 можно наблюдать на рисунке 4.13 и в таблице 4.3. По всем испытанным образцам общая тенденция такая, что с увеличением напряжения на ступени значения параметров упругости модели, параметров вязкости модели и постоянной времени уменьшаются.



(а)



(б)

Рисунок 4.13 – Зависимости параметров упругости, параметров вязкости и постоянной времени образца каменной соли 36-9-2 от напряжений на ступени: а – параметры упругости модели E_1 и E_2 ; б – параметры вязкости модели η_1 и η_2

Была проведена статистическая обработка полученных результатов по формуле (4.4) и для всех образцов каменной соли. По всем испытанным образцам коэффициент детерминации R^2 регрессионных зависимостей при аппроксимации находился в пределах от 0,919 до 0,999, коэффициент вариации от

0,10 до 0,71 %, что также говорит об удовлетворительном соответствии модели (4.4) и экспериментальных данных.

4.4 Сравнение полученных результатов испытаний образцов бишофитовой породы и каменной соли

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 4.14 приведены графики зависимостей деформаций от времени для образца бишофита и каменной соли.

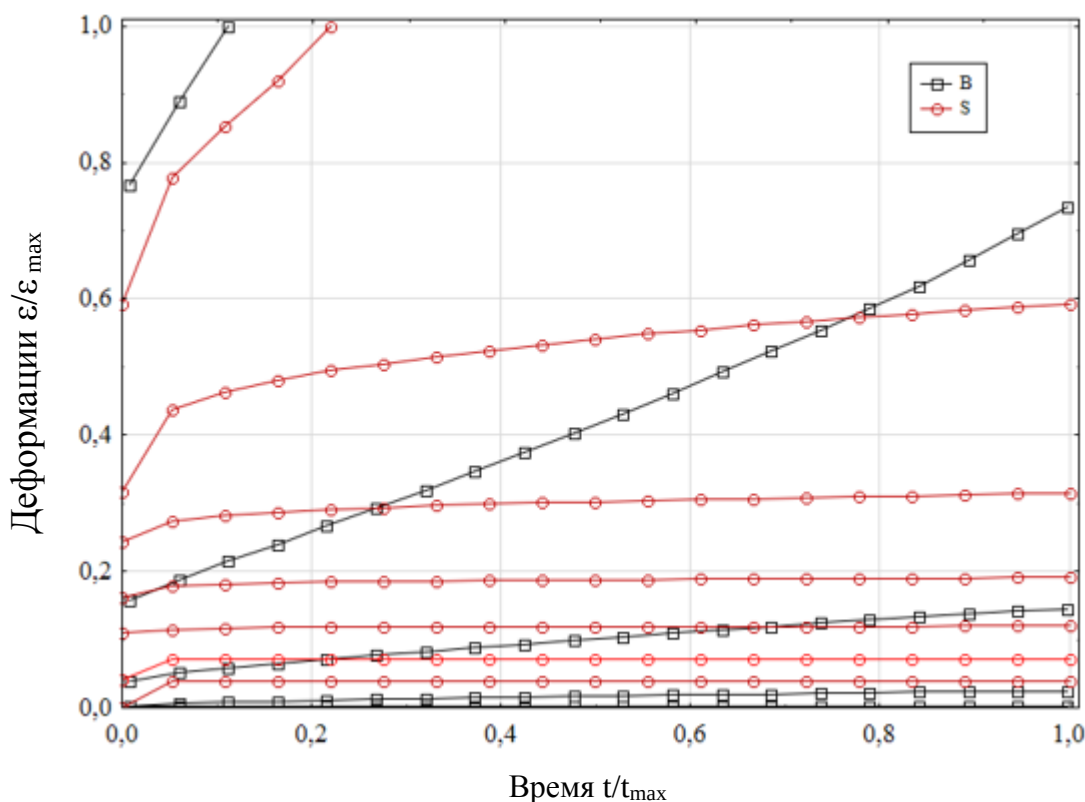


Рисунок 4.14 – Нормированные кривые ступенчатого нагружения образца бишофита 10-6-2 и каменной соли 36-9-2: B - бишофит, S - каменная соль

Как видно из рисунка 4.14, ползучесть у образца бишофита начинает проявляться на более низком уровне при значении относительных деформаций $\epsilon/\epsilon_{\max}$ 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.

Поскольку в природных условиях каменная соль является вмещающей породой для бишофита, такое различие должно быть учтено при геомеханических расчетах и проектировании объектов подземного и шахтного строительства.

Тем самым подтверждается третье научное положение.

Выводы по главе 4

Анализируя полученные экспериментальные данные по результатам проведенных реологических испытаний образцов бишофита в режиме одноосного ступенчатого нагружения, можно сделать следующие выводы.

1. Залежи бишофитовых пластов залегают на глубинах 900–1900 м и имеют мощность от 7 до 280 м. Горизонты и пачки солей с бишофитовыми образованиями располагаются в основном в верхней части соляных толщ га-логенных формаций и могут в значительной степени повлиять на напряженно-деформированное состояние массива в области границ с породами других типов ввиду отличия своих упругих и реологических свойств. Результаты одноосных реологических испытаний образцов бишофита Волгоградского ПХГ в сравнении с образцами каменной соли показали их качественную схожесть. В то же время бишофит проявил более выраженную текучесть, возникающую уже при небольших напряжениях.

2. Получены кривые деформирования образцов бишофита и каменной соли при ступенчатом нагружении образцов, обоснована феноменологическая модель, удовлетворительно описывающая деформации ползучести во времени в зависимости от приложенных напряжений. Модель основана на использовании комбинации элементов Гука и Ньютона. На их основе составлена математическая модель, позволяющая учитывать упругие деформации, а также затухающую, установившуюся и прогрессирующую ползучести. Показано, что с

увеличением напряжения параметры упругости и параметры вязкости уменьшаются, что описывает последовательный переход бишофита от упругой стадии к затухающей, установившейся и прогрессирующей ползучести.

3. Показано отличие бишофита и каменной соли в уровне напряжений, при которых отчетливо проявляется ползучесть. У бишофита она проявляется при абсолютных напряжениях выше 0,5 МПа, а у испытанных образцов каменной соли выше 5 МПа, т. е. отличие на порядок. При оценке по напряжениям и деформациям, отнесенным к своим максимумам, ползучесть у бишофита проявляется при значении относительных деформаций выше 0,0013 и напряжения выше 0,19, а у каменной соли выше 0,11 и 0,43 соответственно.

4. Полученные параметры ползучести нашли применение при оценке напряженно-деформированного состояния соляных массивов горных пород, содержащих пласты бишофита, что важно для проектирования подземных сооружений, в частности, подземных хранилищ углеводородов.

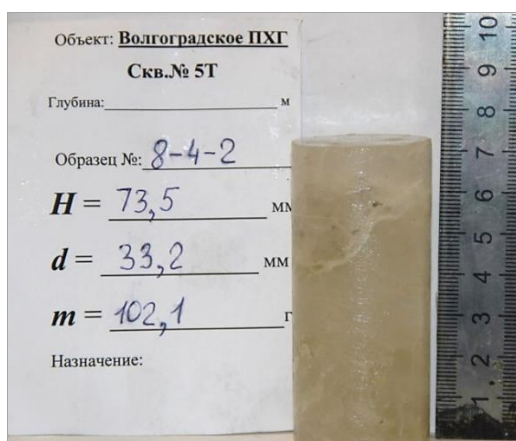
5 Экспериментальное определение реологических свойств бишофитовой породы в трехосном напряженном состоянии

5.1 Образцы и методика испытаний

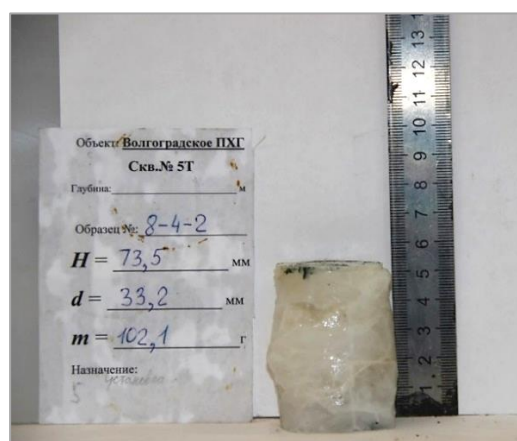
5.1.1 Образцы для проведения испытаний

Всего было изготовлено 19 образцов бишофита с соотношением высоты к диаметру 2:1. Высота образцов бишофита изменялась от 70,0 до 80,0 мм и диаметр от 35,0 до 40,0 мм. У всех образцов определялись масса и геометрические размеры, а также плотность. Среднее значение плотности составило $1,59 \text{ г/см}^3$. Пример образца №8-4-2 после испытания представлен на рисунке 5.1. Перед началом эксперимента образец бишофита упаковывался в специальную оболочку, с помощью которой был исключен контакт образца с внешней средой при испытании в машине нагружения (рисунок 2.18).

Были проведены сравнительные исследования на образцах каменной соли с Волгоградского ПХГ из скважины 8т с глубин 1405,0 – 1415,0 м. Химический анализ исследуемых образцов каменной соли показал содержание NaCl более 90%. Химический состав по всем образцам показал полную идентичность, что дало основание для их испытаний в одной группе.



(а)



(б)

Рисунок 5.1 – Фотографии образцов бишофита №8-4-2 до (а) и после (б) испытания

5.1.2 Методика проведения испытаний

Отличие опытов на ползучесть в сложном напряженном состоянии от опытов на ползучесть в режиме одноосного нагружения заключается в том, что на образец, внутри рабочей камеры, действует боковое давление. Боковое давление воздействует на образец при помощи рабочей жидкости – масла. Во избежание попадания масла в микротрещины образца все образцы изолировались от такого проникновения.

При планировании экспериментов было учтено, что при длительном воздействии постоянной нагрузки различают затухающую, установившуюся и прогрессирующую виды ползучести. Из них в первую очередь интерес представляло проявление только затухающей ползучести, для которой напряжение, не превысившее границу ее проявления, практически никогда не разрушает породу и характеризует предел длительной прочности σ^∞ , который используется для расчета характеристик безопасного строительства и эксплуатации подземных объектов.

Ввиду отсутствия регламентирующих документов федерального значения по определению реологических свойств горных пород эксперименты включали пробные испытания, целью которых было установить величины напряжений и последовательность их изменения для получения наиболее полной картины деформирования образцов при ползучести.

Максимальное главное напряжение σ_1 задавалось в зависимости от условия залегания проектируемой выработки, а именно, исходя из суммы главных напряжений, соответствующей глубине заложения кровли выработки:

$$\sigma = \sigma_1 + 2\sigma_3 \quad (5.1)$$

где σ – сумма главных напряжений, МПа;

σ_1, σ_3 – максимальное и минимальное главные напряжения, МПа;

Учитывая, что деформационные процессы в бишофите протекают быстрее, чем в каменной соли [129, 130, 131], в методику испытаний были внесены

соответствующие коррективы. Сочетание напряжений, аналогичных напряжениям для образцов каменной соли, приводило к быстрому разрушению образцов бишофита из-за перехода в прогрессирующую ползучесть. В связи с этим значения разностей главных напряжений были приняты равными 2, 5, 8, 11, 14 и 17 МПа при неизменной сумме главных напряжений. Первое значение разности главных напряжений 2 МПа было выбрано из тех соображений, чтобы не было быстрого перехода в прогрессирующую ползучесть. Кроме того, ввиду ограниченного количества образцов бишофита было принято решение проводить трехосные испытания, изменяя разность главных напряжений в серии от меньшего значения к большему. Такой режим проведения эксперимента позволил получить более полную картину поведения образцов бишофита в каждом интервале напряжений.

5.2 Результаты

В таблице 5.1 представлены данные проведения экспериментов при сумме главных напряжений 59 МПа, а также указаны продолжительности экспериментов. 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 5.2 – 5.5.

Таблица 5.1 – Значения разности главных напряжений и продолжительности эксперимента при сумме главных напряжений 59 МПа

№ п/п	Номер образца	Продолжительность эксперимента, ч	Глубина залегания, м	σ_1 , МПа	σ_3 , МПа	Разность главных напряжений $\Delta\sigma$, МПа	Сумма главных напряжений σ , МПа
1	8-1-3	40	1332	27	16	11	59
2	8-5-1	85	1332	27	16	11	59
3	8-1-2	3,3	1332	29	15	14	59
4	8-3-2	3,3	1332	29	15	14	59
5	8-4-2	2	1332	31	14	17	59
6	8-5-2	2	1332	31	14	17	59
7	7-18-2	90	1332	21	19	2	59
8	7-18-2	300	1332	23	18	5	59
9	7-18-4	91,5	1332	21	19	2	59
10	7-18-4	301	1332	23	18	5	59
11	7-17-2	305	1332	23	18	5	59
12	7-17-3	305	1332	23	18	5	59
13	7-18-3	68,5	1332	25	17	8	59
14	7-17-4	208	1332	25	17	8	59

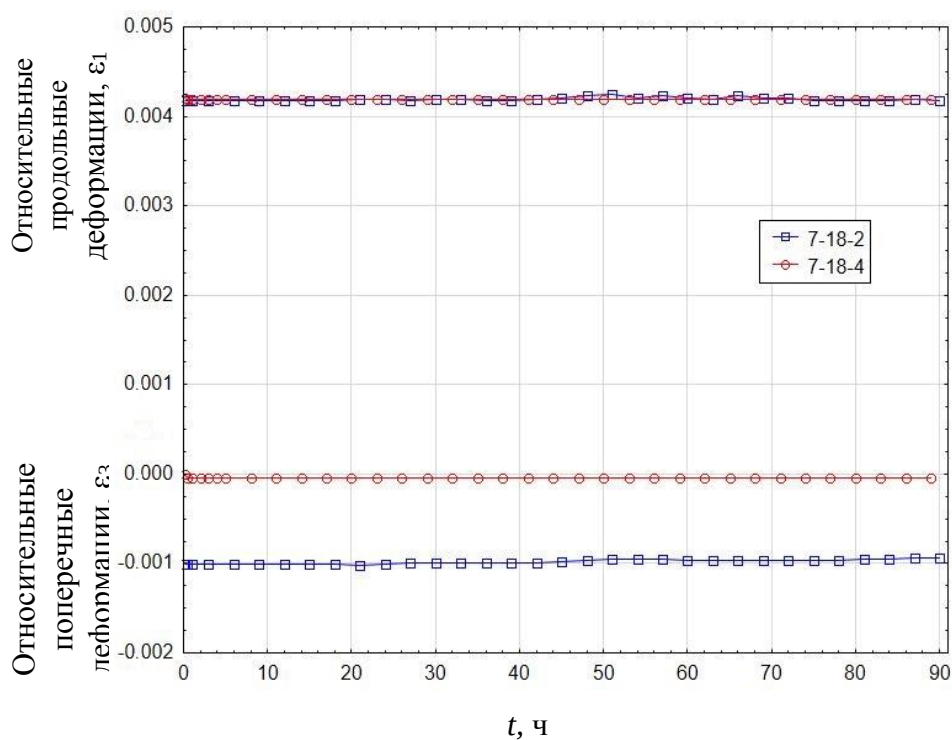


Рисунок 5.2 – Зависимость продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени образцов бишофита 7-18-2 и 7-18-4 при $\Delta\sigma = 2$ МПа

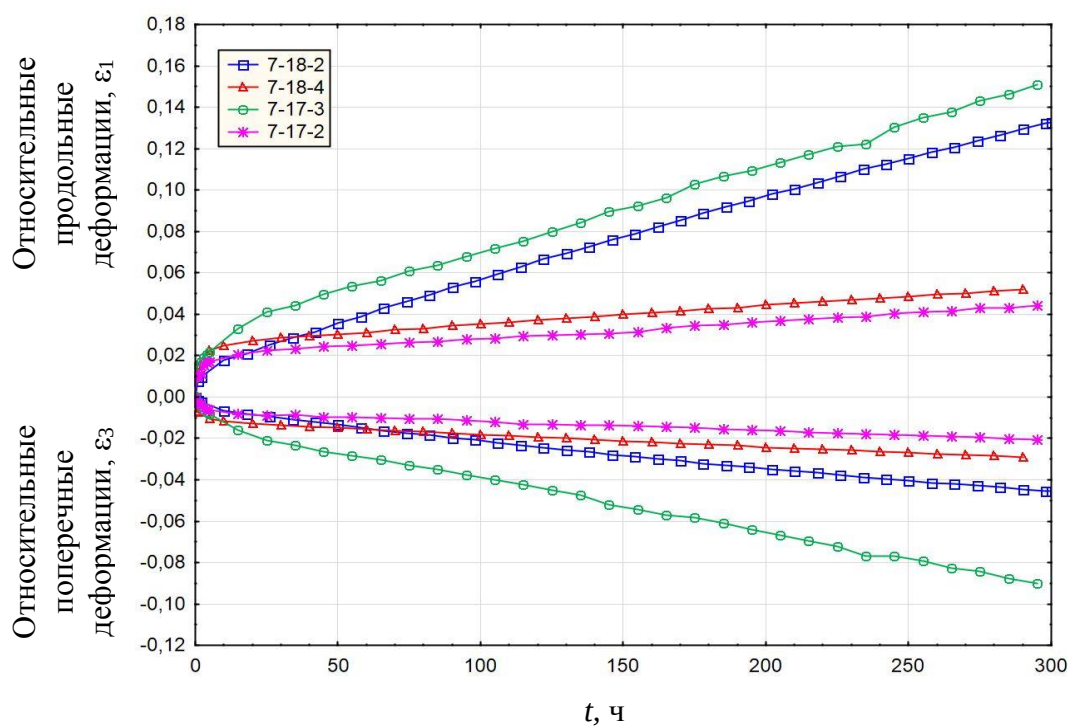


Рисунок 5.3 – Зависимость продольных ϵ_1 и поперечных ϵ_3 деформаций от времени образцов бишофита 7-18-2, 7-18-4, 7-17-2, 7-17-3 при $\Delta\sigma = 5$ МПа

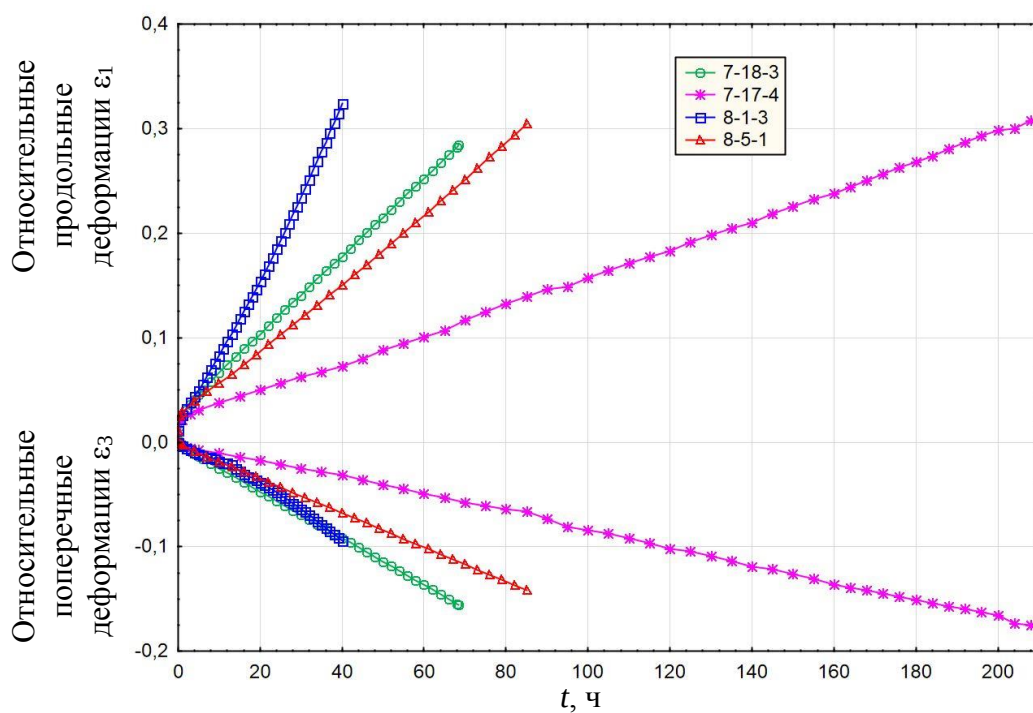


Рисунок 5.4 – Зависимость продольных ϵ_1 и поперечных ϵ_3 деформаций от времени образцов бишофита 7-18-3 и 7-17-4 при $\Delta\sigma = 8$ МПа; 8-1-3 и 8-5-1 при $\Delta\sigma = 11$ МПа

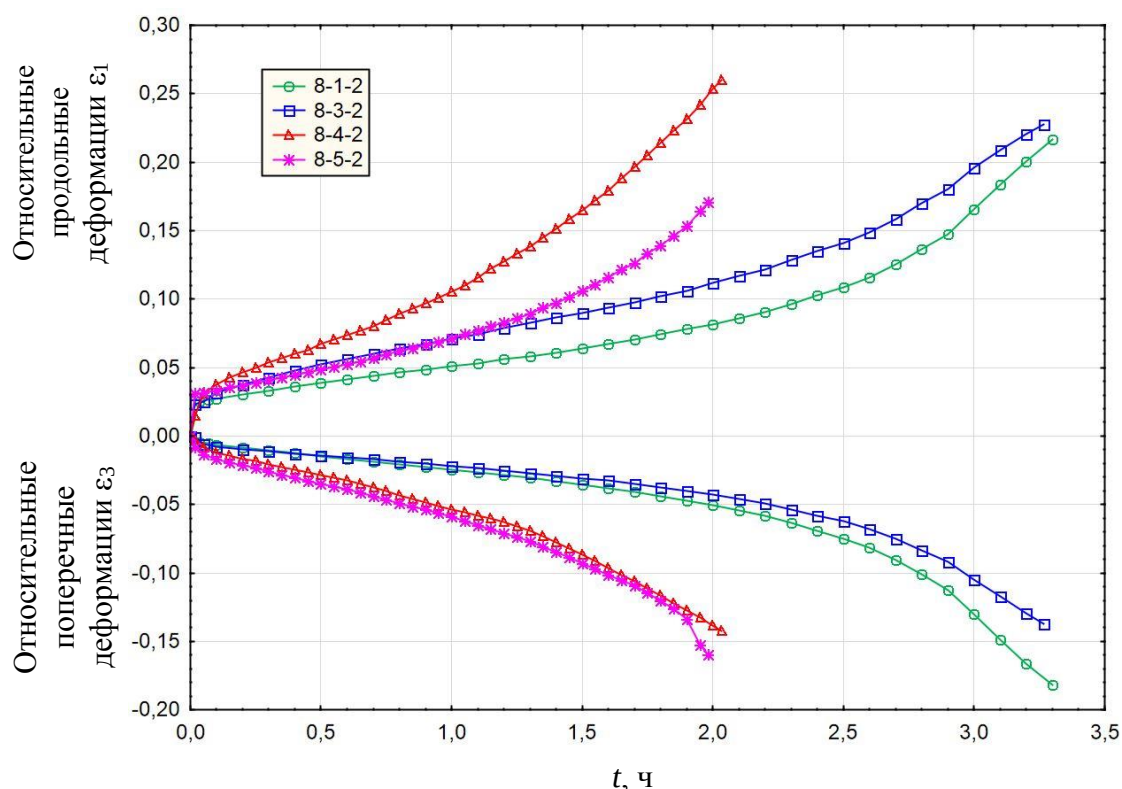


Рисунок 5.5 – Зависимость продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени образцов бишофита 8-1-2, 8-3-2 при $\Delta\sigma = 14$ МПа; 8-4-2, 8-5-2 при $\Delta\sigma = 17$ МПа

5.3 Анализ результатов

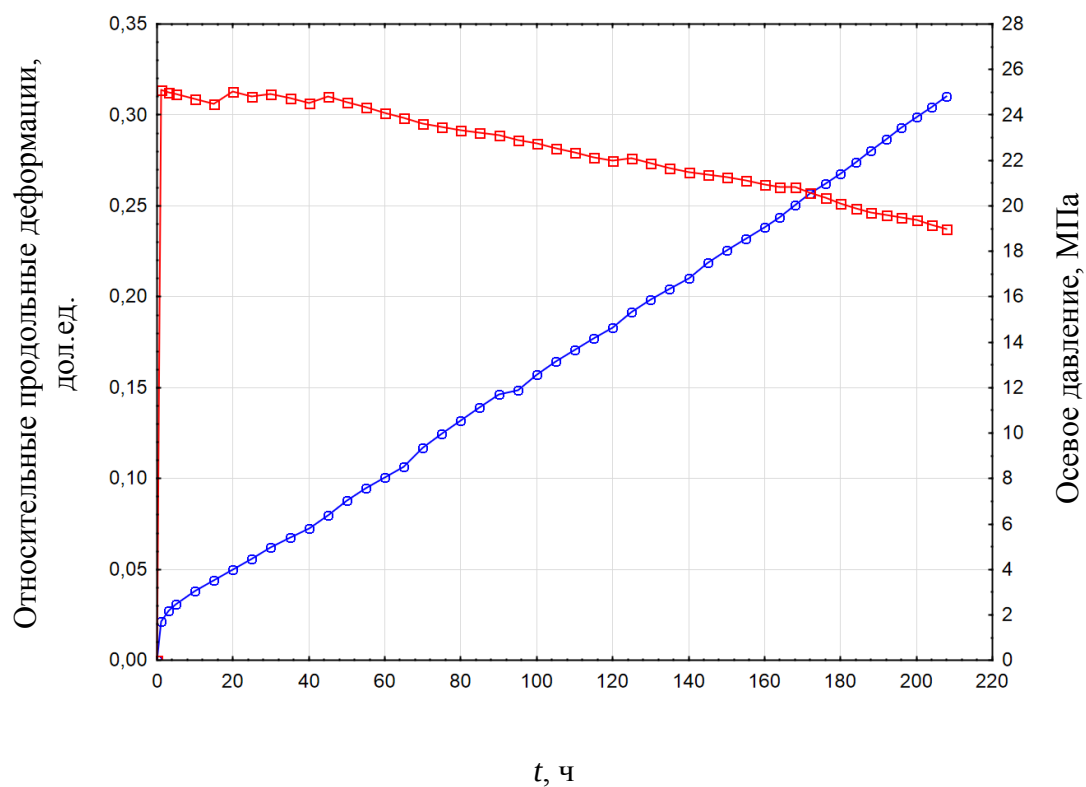
5.3.1 Общие особенности

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 5.2–5.5. Уже

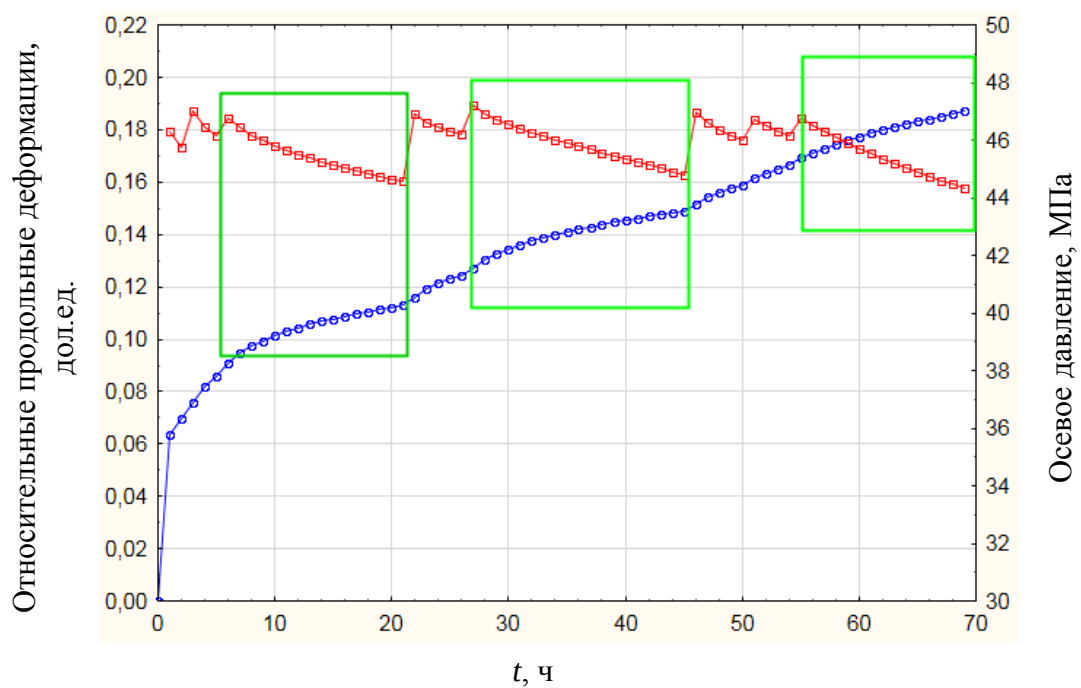
при разности главных напряжений 5 МПа бишофит проявил свои ярко выраженные реологические свойства. Было установлено, что при увеличении разности главных напряжений уменьшается время, которое необходимо образцу для перехода в прогрессирующую ползучесть.

При длительном деформировании образцов бишофита в опытах на ползучесть площадь образца менялась в течение эксперимента и осевое напряжение являлось функцией радиальных деформаций образца. Это было учтено при последующих расчетах. Фактическая нагрузка пересчитывалась в осевое напряжение по формуле (3.3).

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 5.6 (а), где приведена зависимость продольных деформаций от времени (ось слева) и действующего осевого давления на образце (ось справа). Для сравнения на рисунке 5.6 (б) представлен график ползучести образца каменной соли с выделенными рамками областями, где происходит затухание ползучести ввиду увеличения поперечного сечения образца.



(а)



(б)

Рисунок 5.6 – 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

Как видно из рисунка 5.6(а) падение 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.

5.3.2 Построение феноменологических моделей ползучести и определение их параметров для образцов бишофитовой породы и каменной соли

Для наглядного математического описания свойств бишофита были использованы феноменологические реологические модели процессов ползучести в таком образце, представляющие собой различные комбинации упругих и вязких элементов. Рассмотрим особенности кривых ползучести образцов с соответствующим описанием вида ползучести [132]. Модель в формуле (4.4) представлена в виде суммы математических выражений, описывающих упругое деформирование, а также затухающую, установившуюся и прогрессирующую ползучести.

В таблице 5.3 приведены параметры модели (4.4), при помощи которой производилась обработка экспериментальных данных. В этой таблице приведены средние значения по всем испытанным образцам бишофита, представленных в таблице 5.1, в зависимости от разности главных напряжений.

Формула (4.4) хорошо описывает деформирование образца на всех ступенях нагружения, что видно из рисунка 5.7, на котором представлен образец бишофита 8-1-2, испытанный при разности главных напряжений 14 МПа.

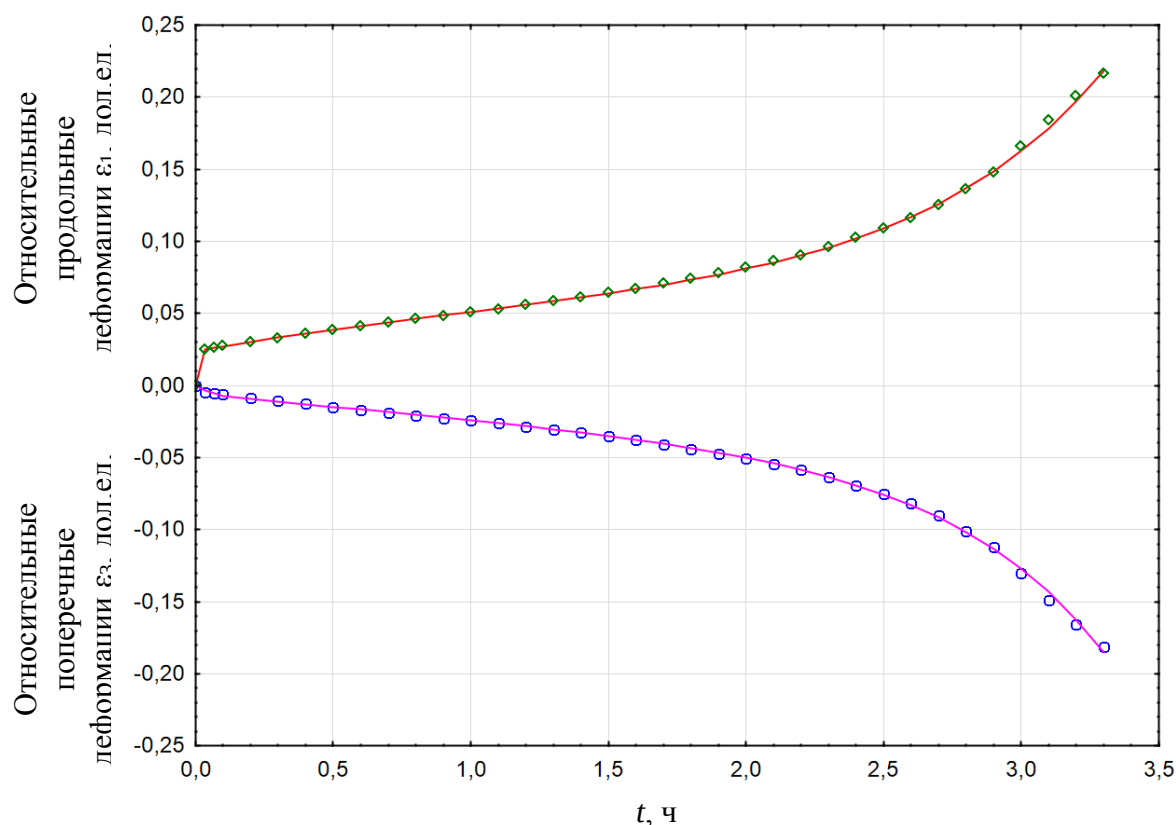


Рисунок 5.7 – Экспериментальные кривые ползучести образца бишофита 8-1-2: фигурные точки – экспериментальные данные; сплошные линии – результат аппроксимации по формуле (4.4)

Таблица 5.3 – Коэффициенты регрессионной модели (4.4) при различных значениях разности главных напряжений образцов бишофита

Разность главных напряжений $\Delta\sigma$, МПа	Параметры упругости модели, МПа			Параметры вязкости модели, МПа·ч		Постоянная времени τ , ч	
	E_1	E_2	E_3	η_1	η_2	τ_2	τ_3
5,0	795,8	428,9	1369,1	9736,0	1563,7	753,8	2791,0
8,0	666,0	352,1	1179,0	3362,0	1089,1	2,9	535,6
11,0	529,0	228,8	1029,7	2068,5	753,9	3,9	11,2
14,0	510,8	224,0	656,5	1018,0	209,5	1,4	0,71
17,0	504,6	201,3	583,6	489,8	67,5	0,4	0,69

Необходимо отметить, что по всем испытанным образцам бишофита значения параметров упругости, параметров вязкости и постоянной времени уменьшаются с увеличением разности главных напряжений, что можно наблюдать в таблице 5.3. 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 очень большое время.

Полученные кривые по каждому образцу были аппроксимированы в соответствии с формулой (4.4). При этом коэффициент детерминации R^2 был не менее 0,999, а коэффициент вариации не превышал 1,9%. Это говорит о том, что уравнение (4.4) удовлетворительно описывает кривые ползучести бишофита.

В качестве сравнения полученных результатов образцов бишофита были проведены реологические испытания в сложном напряженном состоянии образцов каменной соли и аппроксимация их экспериментальных данных по формуле (4.4).

В таблице 5.4 приведены параметры модели (4.4), при помощи которой производилась обработка экспериментальных данных. В этой таблице приведены средние значения по всем испытанным образцам каменной соли в зависимости от разности главных напряжений.

Формула (4.4) хорошо описывает деформирование образца на всех ступенях нагружения, что видно из рисунка 5.8, на котором представлен образец каменной соли 92-4, испытанный при разности главных напряжений 14 МПа.

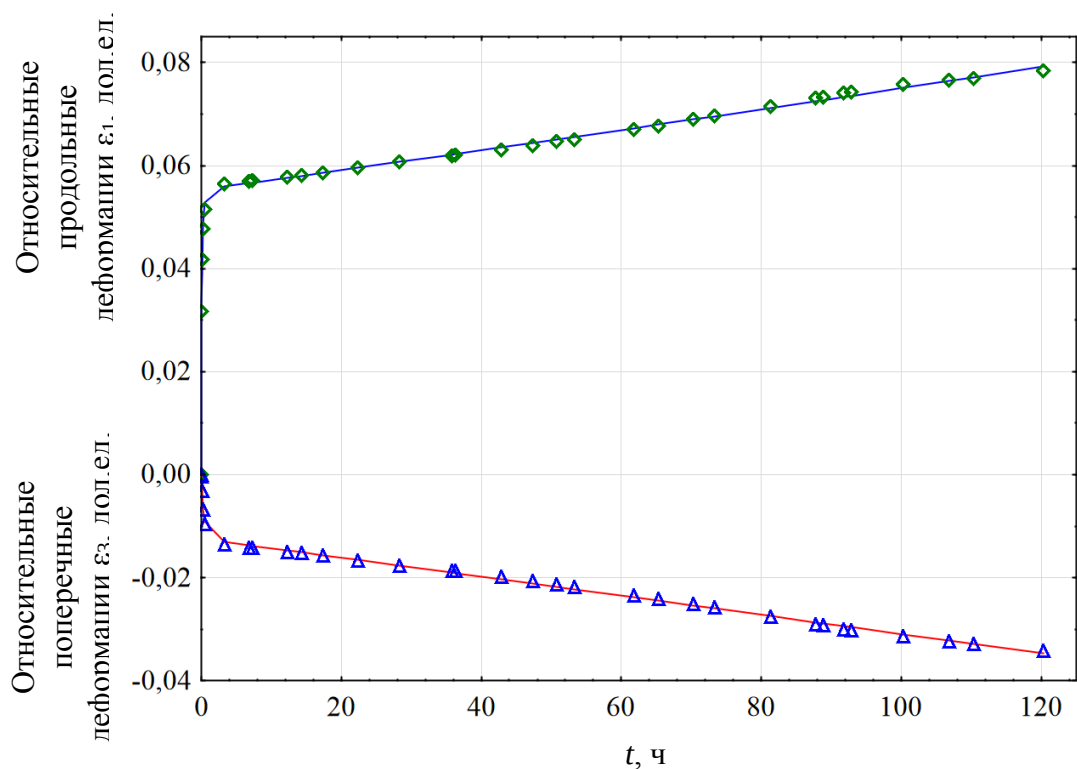


Рисунок 5.8 – Экспериментальные кривые ползучести образца каменной соли 8-1-2: фигурные точки – экспериментальные данные; сплошные линии – результат аппроксимации по формуле (4.4)

Таблица 5.4 – Коэффициенты регрессионной модели (4.4) при различных значениях разности главных напряжений образцов каменной соли

Разность главных напряжений $\Delta\sigma$, МПа	Параметры упругости модели, МПа			Параметры вязкости модели, МПа·ч		Постоянная времени τ , ч	
	E_1	E_2	E_3	η_1	η_2	τ_2	τ_3
5,0	425,3	362,4	254,7	10312,2	927,8	24,2	24839,2
8,0	397,4	285,4	129,3	5534,8	245,1	13,9	10527,4
11,0	370,0	181,2	47,6	1736,2	34,7	4,7	1033,6
14,0	356,2	159,6	38,1	867,4	25,9	2,4	867,5
17,0	332,4	137,3	26,9	591,7	18,5	1,8	672,4

Также, как и в случае с образцами бишофита, значения параметров упругости, параметров вязкости и постоянной времени уменьшаются с проявлением той или иной стадии ползучести, что на примере образца каменной соли 92–4 можно наблюдать в таблице 5.4. Но в отличие от бишофита, образцы каменной соли не перешли на заключительную стадию – прогрессирующую ползучесть. Как уже отмечалось выше, большие значения какого-то из параметров говорят о том, что на данной ступени ползучесть образца либо отсутствует, либо проявляет себя крайне незначительно. Такие значения носят формальный характер и позволяют судить о том, что ползучесть проявится через большое время, значительно превышающее время ступени испытания. По всем испытанным образцам общая тенденция такая, что с увеличением напряжения на ступени значения параметров упругости, параметров вязкости и постоянной времени уменьшаются.

Коэффициенты детерминации регрессионных зависимостей при аппроксимации кривых образцов каменной соли находится в пределах от 0,998 до 0,999, коэффициент вариации от 0,5 до 1,3 %, что также говорит об удовлетворительном соответствии модели (4.4) экспериментальным данным.

По результатам исследований разработан интернет–ресурс [133], на котором представлены исходные данные по экспериментальным данным испытаний образцов бишофитовой породы и образцов каменной соли по проведенным реологическим испытаниям в трехосном напряженном состоянии.

5.3.3 Сравнение полученных результатов испытаний образцов бишофитовой породы и каменной соли

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 5.9 приведены нормированные графики зависимостей деформаций от времени для образца бишофита и каменной соли при одинаковой разности главных напряжений, равной 11 МПа.

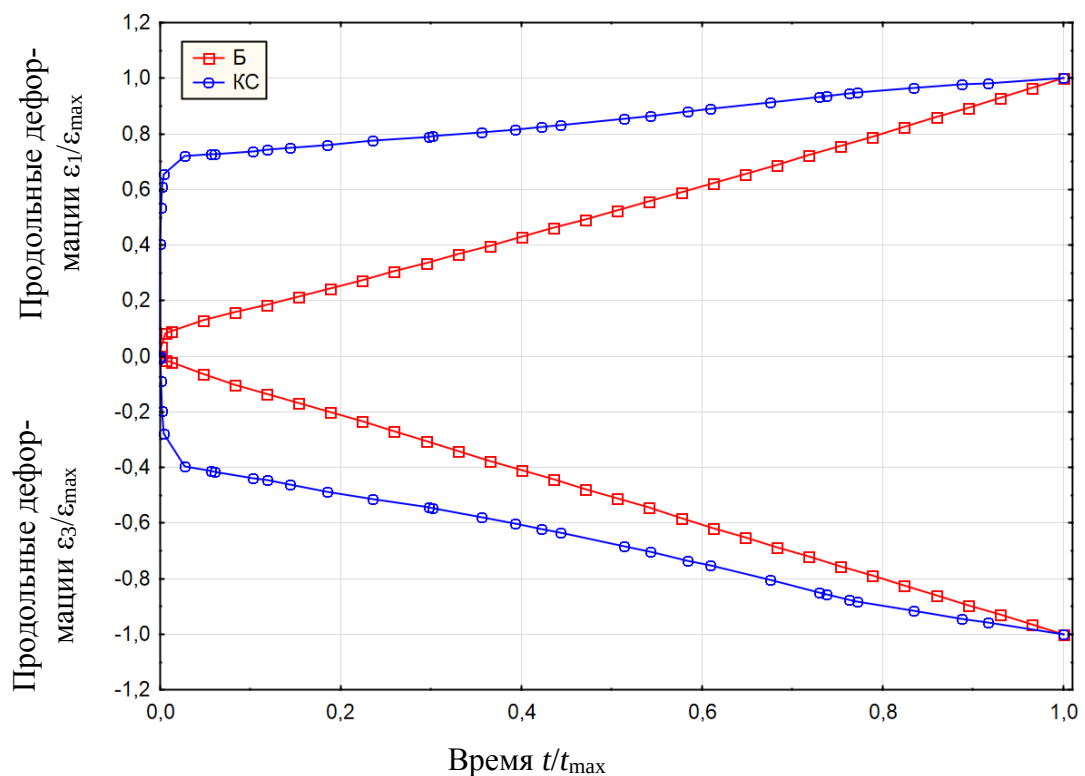


Рисунок 5.9 – Нормированные кривые ступенчатого нагружения образца бишофита 8-5-1 (Б) и каменной соли 92-4 (КС) $\Delta\sigma = 11$ МПа

Как видно из рисунка 5.9, ползучесть у образца бишофита начинает проявляться на более низком уровне нагрузок при значении относительных деформаций выше 0,034, а у каменной соли выше 0,056. Это говорит о том, что даже при незначительном механическом воздействии образцы бишофита проявляют свои ярко выраженные реологические свойства.

5.4 Интерполяция реологических кривых ползучести бишофитовой породы для произвольных разностей главных напряжений

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 (4.4) 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 зависимости. Поэтому были разработаны алгоритм и программа для ЭВМ [134] получения искомых кривых для любой заданной разности главных напряжений, базирующийся на прибавлении к значениям нижней кривой добавки, пропорциональной величине превышения заданной разности главных напряжений над ближайшим меньшим значением, полученным экспериментальным путем.

Алгоритм включает 4 основных блока.

Блок 1. Задание разности главных напряжений $\Delta\sigma_g$, для которой нужно рассчитать параметры интерполяционной кривой.

Блок 2. Исходными данными для расчета являются:

$\varepsilon_i(t_j)$, $\varepsilon_{i+1}(t_j)$ – кривые деформирования при разностях напряжений $\Delta\sigma_i$ и $\Delta\sigma_{i+1}$ соответственно;

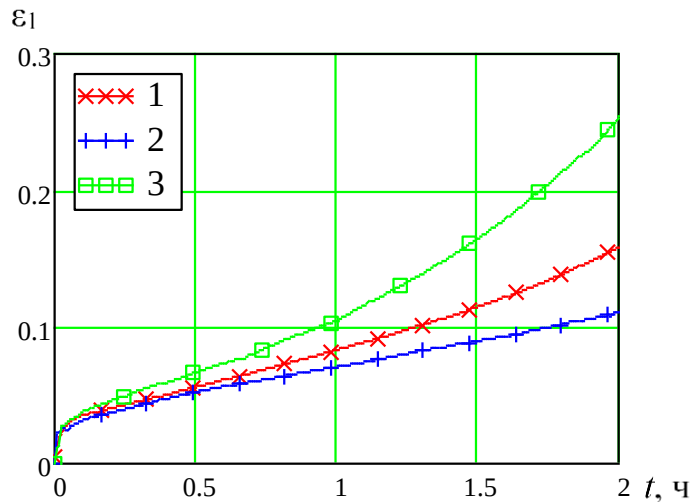
$\Delta\sigma_i$, $\Delta\sigma_{i+1}$ – разности напряжений, при которых сняты кривые $\varepsilon_i(t_j)$ и $\varepsilon_{i+1}(t_j)$, при этом $\Delta\sigma_i \leq \Delta\sigma_g < \Delta\sigma_{i+1}$;

$\Delta\sigma_g(t_j)$, $\varepsilon_g(t_j)$ – разность главных напряжений и деформация для момента времени t_j , при котором рассчитывается очередная точка интерполяционной кривой.

Блок 3. Расчет отсчетов по времени интерполяционной кривой осуществляется в соответствии с формулой

$$\varepsilon_g(t_j) = \varepsilon_i(t_j) + (\varepsilon_{i+1}(t_j) - \varepsilon_i(t_j)) \left(\frac{\Delta\sigma_g - \Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_{i+1} - \Delta\sigma_i} \right) \quad (5.3)$$

Для сокращения записи переменная в скобках t_j далее опускается.



1 – минимальная экспериментальная кривая, 2 – максимальная экспериментальная кривая, 3 – интерполяционная кривая

Рисунок 5.11 – Расчет отсчетов по времени интерполяционных кривых

Блок 4. Расчет коэффициентов интерполяционной кривой в соответствии с формулой (4.4) осуществляется в несколько этапов.

4.1. Расчет коэффициентов по формуле (5.3), получаемой из формулы (4.4), при ограничении первыми двумя слагаемыми

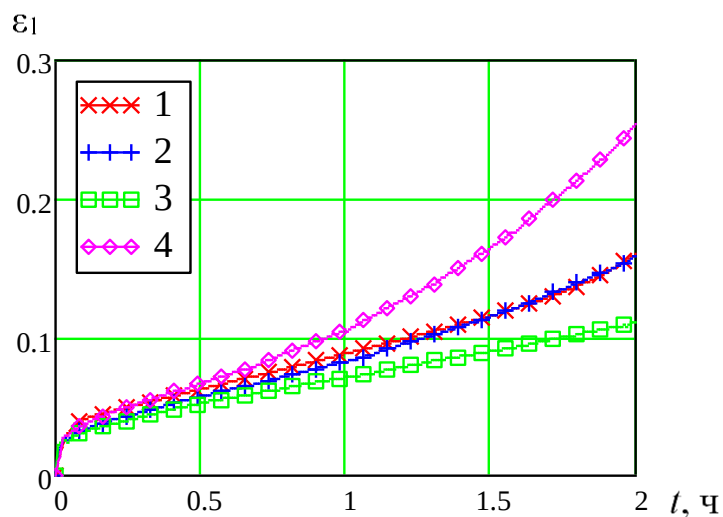
$$\varepsilon(\Delta\sigma, t) = \frac{\Delta\sigma}{E_1} + \left(\frac{\Delta\sigma}{E_2} - \frac{\Delta\sigma}{E_1} \right) \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \quad (5.4)$$

4.2. Расчет коэффициентов по формуле (5.4), полученной из формулы (4.4), при ограничении первыми тремя слагаемыми

$$\varepsilon(\Delta\sigma, t) = \frac{\Delta\sigma}{E_1} + \left(\frac{\Delta\sigma}{E_2} - \frac{\Delta\sigma}{E_1} \right) \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) + \left(\frac{\Delta\sigma}{\eta_1} \right) t \quad (5.5)$$

4.3. Расчет коэффициентов по формуле (4.4) без ограничений количества слагаемых.

Как показали результаты интерполяции, полученные коэффициенты недостаточно хорошо аппроксимируют найденную кривую, рассчитанную по формуле (5.3). Поэтому была введена еще одна дополнительная ступень для дополнительной аппроксимации при использовании полученных коэффициентов в качестве приближенных значений для подбора коэффициентов по алгоритму Левенберга-Марквардта.



1 – полная кривая, 2 – интерполяционная кривая, 3 – минимальная кривая, 4 – максимальная кривая

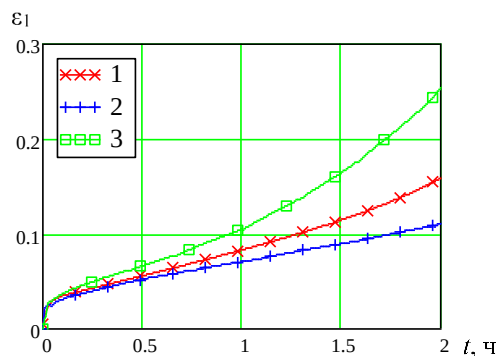
Рисунок 5.12 – Расчет коэффициентов по формуле (5.3)

4.4. Подбор коэффициентов интерполяционной кривой на заключительном этапе.

На рисунке 5.13 представлен график интерполяционной кривой, а также исходные кривые, по которым производилась интерполяция. Значения соответствующих коэффициентов приведены ниже:

$E_1=3365$ МПа, $E_2=493,5$ МПа, $E_3=35150$ МПа, $\eta_1=300$ МПа·ч,
 $\eta_2=10,8$ МПа·ч, $\tau_3=0,47$ ч.

Они могут быть использованы при моделировании и расчетах сооружений в средах, включающих бишофит.



1 – интерполяционная кривая, 2 – минимальная кривая, 3 – максимальная кривая

Рисунок 5.13 – Подбор интерполяционной кривой на заключительном этапе

При оценке погрешностей был произведен расчет максимальных значений разностей между интерполяционными кривыми и кривыми, построенными по полученным коэффициентам с шагом изменения разности главных напряжений $\Delta\sigma_g$ 0,1 МПа в диапазоне от минимального до максимального экспериментальных значений. Погрешность, приведенная к максимальному значению времени, не превышала 1%.

Тем самым подтверждается четвертое научное положение.

Выводы по главе 5

Анализируя полученные экспериментальные данные по результатам проведенных реологических испытаний образцов бишофита в трехосном напряженном состоянии, можно сделать следующие выводы.

1. Результаты испытаний образцов бишофита Волгоградского ПХГ под нагрузкой в трехосном напряженном состоянии в сравнении с образцами каменной соли показали, что осевое давление σ_1 постоянно уменьшается из-за увеличения площади поперечного сечения образца. В отличие от образцов каменной соли, скорости деформирования которых при этом уменьшаются, на скоростях деформирования бишофита такое снижение практически не сказывается, и деформационные кривые в зависимости от времени остаются линейными.

2. Ползучесть у образцов бишофита при разности главных напряжений, равной 2 МПа, никак не проявляется, поэтому проводить такие исследования в дальнейшем не требуется. При разности главных напряжений равной 5 МПа проявились ярко выраженные реологические свойства. На протяжении всего времени экспериментов отчетливо проявлялась установившаяся ползучесть, но в то же самое время наблюдался рост как продольных, так и поперечных деформаций со временем. При разности главных напряжений равной 8, 11, 14 и 17 МПа образцы перешли на стадию прогрессирующей ползучести.

3. Получена феноменологическая модель, которая включает в себя ряд экспонент с параметрами упругости и параметрами вязкости. Данная модель удовлетворительно описывает кривые ползучести образцов бишофита.

4. Показано, что с увеличением разности главных напряжений параметры упругости и параметры вязкости уменьшаются, что описывает последовательный переход бишофита от упругой стадии к затухающей, установившейся и прогрессирующей ползучести.

5. Разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать реологические характеристики для произвольных разностей главных напряжений, находящихся между минимальными и максимальными значениями, заданными в эксперименте.

6. Полученные параметры ползучести найдут применение при оценке напряженно-деформированного состояния соляных массивов горных пород, содержащих пласты бишофита, что важно для проектирования подземных сооружений, в частности, подземных хранилищ углеводородов в массивах, содержащих прослойки бишофита.

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 также 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 ползучесть 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Деревягин В.С., Свидзинский С.А., Седлецкий В.И. и др. Нижнепермская галогенная формация Северного Прикаспия. – Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1981. – 397 с.
- 2 Гребенников Н.П., Ермаков В.А., Жарков М.А., Жаркова Т.М., Мерзляков Г.А., Аксенов Л.Л. Особенности строения залежей бишофита и калийных солей. – Новосибирск.: Наука, 1980. – 112 с.
- 3 Деревягин В.С., Седлецкий В.И., Ермаков В.А., Гребенников Н.П., Свидзинский С.А. Бишофиты Нижнего Поволжья. – Ростов н/Д.: Издательство Ростовского университета, 1989. – 96 с.
- 4 Свидзинский С. А., Московский Г. А. Поволжский бишофитовый бассейн: строение, условия образования, геолого-промышленная оценка. – Саратов.: Научная книга, 2004. – 104с.
- 5 Ермаков В. А., Исаев А. Я., Гетманова Е. И. Гидрохимическая толща на территории западного обрамления Прикаспийской синеклизы // Геология нефти и газа. – 1968. – №5. – С. 33-38.
- 6 Свидзинский С.А., Ковальский Ф.И., Аношин Л.В., Музалевский М.М. Результаты изучения калиеносности Приволжской моноклинали // Литолого-фациальные особенности осадконакопления в эвапоритовых бассейнах. – 1983. – С. 89-90.
- 7 Гриценко И.А., Овчинников А.Д. Некоторые вопросы устойчивости бишофита в приствольной зоне скважины // Нефтепромысловая геология и строительство скважин в Прикаспийском регионе. – 1986 г. – С. 101-105.
- 8 Кротков К.Ф. Использование нагретых буровых растворов для уменьшения воздействия солей в скважинах. М., ВНИИОЭНГ, экспресс-информ. сер. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – №9. – 1995.
- 9 Горная энциклопедия: т. 1. / редкол.: Е. А. Козловский (гл. ред.) и др. – Москва : Советская энциклопедия. – 1984.

- 10 Жарков М.А. Палеозойские соленосные формации мира. – М.: Недра, 1974. – 392 с.
- 11 Валяшко М.Г. Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. – Москва.: Издательство Московского университета, 1962. – 402 с.
- 12 Иванов А.А., Воронова М.Л. Галогенные формации (минеральный состав, типы и условия образования; методы поисков и разведки месторождений минеральных солей). – М.: Недра, 1972. – 328 с.
- 13 Журавлёва Т.Ю. Инженерно-геологическая характеристика соляных формаций в связи с созданием подземных хранилищ углеводородов: дис. кандидата геолого-минералогических наук: 04.00.07 / Журавлева Татьяна Юрьевна; [Место защиты: МГУ им. Ломоносова].- Москва, 1996. – 133 с.
- 14 Паньков И.Л., Морозов И.А. О влиянии коэффициента трения на значения показателей механических свойств каменной соли при сжатии образцов различной высоты // Горное эхо. – 2014. – № 2-3. – С. 43-47.
- 15 Проскуряков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. – 272 с.
- 16 Аптуков В.Н., Константинова С.А. Особенности разрушения образцов перистой каменной соли при испытаниях на сжатие // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. – № 3. – С. 58-66.
- 17 Паньков И.Л., Морозов И.А. Изучение влияния коэффициента трения на механические показатели соляных пород при сжатии образцов различной высоты // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. Т.12. – 2013. – № 7. – С. 57-67.
- 18 Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.
- 19 Барях А.А., Маловичко А.А., Шумихина А.Ю. Формирование зон техногенной нарушенности над выработанным пространством калийных рудников

- // Физическо-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – №2. – С. 36-47.
- 20 Griffith, A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences – 1921. – Vol. 221. P. 163–198.
- 21 Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. Изд. 3-е. перераб. и доп. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
- 22 Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
- 23 Баклашов И.В. Основы геомеханики. – Т. 1. – М.: МГГУ, 2004. – 208 с.
- 24 Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей/Учеб. для вузов.- 3-е изд. – М.: Студент, 2012. – 543 с.
- 25 Руппенейт К. В., Баклашов И. В. Прочность незакрепленных горных выработок. – Москва.: Недра, 1965. – 105 с.
- 26 Рахматуллин Х.А., Шемякин Е.И., Демьянов Ю.А., Звягин А.В. Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках. – М.: Логос, 2008. – 616 с.
- 27 Одинцев В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. – М.: ИПКОН РАН, 2006. – 168 с.
- 28 Милетенко И.В., Милетенко Н.А., Одинцев В.Н. Новый геомеханический подход к прогнозу опасных гидрогеологических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 7. – С. 103-108.
- 29 Певзнер М.Е., Иофис М.А., Попов В.Н. Геомеханика: Учебник для вузов. – М.: Горная книга, 2008. – 437 с.
- 30 Баклашов И.В., Картозия Б.А., Шашенко А.Н., Борисов В.Н. Геомеханика: Учебник для вузов. Том 2. Геомеханические процессы. – М.: МГГУ, 2004. – 249 с.
- 31 Кадомцев А.Г., Дамаскинская Е.Е., Куксенко В.С. Особенности разрушения гранита при различных условиях деформирования // Физика твердого тела. – Т. 53. – Вып. 9. – 2011. – С. 1777-1782.

- 32 Каспарьян Э. В., Козырев А. А., Иофис М. А., Макаров А. Б. Геомеханика. – М.: Высшая школа, 2006. – 504 с.
- 33 Черепанов Г.П., Ершов Л.В. Механика разрушения. – М.: Машиностроение, 1977. – 224 с.
- 34 Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров. – М.: Горная книга, 2006. – 391 с.
- 35 Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.
- 36 Протоdjяконов М.М., Чирков С.Е. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. – М.: Наука, 1964. – 69 с.
- 37 Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
- 38 Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
- 39 Li, H., Yang, C., Liu, Y., Chen, F., & Ma, H. Experimental study of ultrasonic velocity and acoustic emission properties of salt rock under uniaxial compression load. Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering – 2014, 33(10). P. 2107-2116. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.10.018
- 40 Мор О. Чем обусловлен предел прочности и временное сопротивление материала // «Новые идеи в технике». - Сборник №1. Теория прочности.- Пет-роград.- Из-во «Образование».- 1915 г.
- 41 А.С. 1244546 (СССР). Способ испытания на прочность соляных пород в ла-бораторных условиях/ Авт. Изобрет. / Карташов Ю.М., Оксенкруг Е.С. Оpubл. В Б.И., 1986, N 26.
- 42 Байков А.С., Носкова Е.И. Определение физико-механических свойств со-ляных пород скважины №44 // Актуальные проблемы охраны труда и без-опасности производства, добычи и использования калийно-магниевых со-лей. – 2018. – с.109-122.
- 43 Усольцева О.М., Цой П.А. Применение кругов Мора для связи и модельной оценки прочностных данных разноразмерных образцов горных пород //

- Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 23-29. DOI: 10.15372/FTPRPI20190203.
- 44 Жабин А.Б., Поляков А.В., Аверин Е.А., Линник Ю.Н., Линник Ю.В. Комплексное влияние размеров образца горной породы на величину предела прочности на сжатие // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 5-13. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_5.
- 45 Тавостин М. Н., Кошелев А. Е. Оценка влияния вида объемного напряженного состояния на механические свойства каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – №11. – С. 130-135.
- 46 Wisetsaen, S., Walsri, C., & Fuenkajorn, K. Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2015. – Vol. 73. P. 10-14. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.10.005.
- 47 Шрайнер В., Менцель В. Закономерности механического поведения каменных солей в лабораторных и натурных условиях. – В кн.: Механика горных пород. Алма-Ата, 1975. – С.64-78.
- 48 Чирков С.Е., Протодяконов М.М. Трещиноватость и прочность горных пород в массиве. – М.: Наука, 1964. – 69 с.
- 49 Воронцов В.Н., Габдрахимов И.Х., Шаманский Г.П. Натурные исследования физико-механических свойств сильвинитовых пород Верхнекамского месторождения // Тр.ВНИИГ. – 1977. – С.28-32.
- 50 Паньков И. Л., Портяная Е. А. Определение прочностных и деформационных свойств соляных пород при сжатии на образцах различного размера // Научные исследования и инновации. – 2011. – Том 5. – №4. – С. 47-49.
- 51 Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. Свойства горных пород и методы их определения. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
- 52 Кошелев А. Е., Тавостин М. Н., **Осипов Ю. В.** Исследование физико-механических свойств каменной соли с учетом предварительного всестороннего нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №2. – С. 89-96.

- 53 Кошелев А. Е. Экспериментальное определение модуля деформации каменной соли в сложном напряженном состоянии // Горный журнал. – 2012. – №9. – С. 56-58.
- 54 Burdine N. Rock failure under dynamic loading conditions // Society of Petroleum Engineers Journal – 1963. – Vol. 3, Iss. 01. P.1–8. <https://doi.org/10.2118/481-PA>.
- 55 Haimson B.C., Kim C.M. Mechanical behaviour of rock under cyclic fatigue. Stability of rock slopes // Proceedings of the 13th symposium on rock mechanics – New York, – 1971. pp 845–863.
- 56 Schuppe F. Ein reologisches Modell für das Salzgesteine. Bergakademie – 1963. – Vol. 15, Iss. 8. P. 583 – 586.
- 57 Höfer K.-H., Knoll P. Untersuchungen zum Mechanismus der Kriechverformung von Carnallit und praktische Anwendungen. Bericht 10. Ländertreff. Int. Büros Gebirgsmech., Leipzig, 1968. Berlin, 1970. P. 194-205.
- 58 Гальперин А.М., Шафаренко Е.М. Реологические расчеты горно-технических сооружений. – М.: Недра, 1977. – 246 с.
- 59 Оксенкруг Е.С., Шафаренко Е.М. Ползучесть и длительная прочность каменной соли // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1974. – №6. – С. 17-19.
- 60 Шкуратник В.Л., Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Экспериментальное исследование зависимостей акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли от напряжений и температуры // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – №4. – С. 20-26. DOI: 10.15372/FTPRPI20190403.
- 61 Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Особенности деформирования каменной соли при повышенных температурах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 1. – С.69-76. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-69-76.

- 62 Tao Z.Y., Mo H.H. An experimental study and analysis of the behavior of rock under cyclic loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1990;27(1):51–6. DOI: 10.1016/0148-9062(90)90008-P.
- 63 Singh T.N., Ray S.K., Singh D.P. Effect of uniaxial cyclic compression on the mechanical behavior of rocks // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences – 1994;1(2):118–20.
- 64 Li N., Chen W., Zhang P. The mechanical properties and a fatigue-damage model for jointed rock masses subjected to dynamic cyclic loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2001. – 38(7). P. 1071–1079. DOI: 10.1016/S1365-1609(01)00058-2.
- 65 Bagde M.N., Petroš V. Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2009. – Vol. 46, Iss. 1. P. 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.05.002>.
- 66 Xiao J.Q., Ding D.X., Jiang F.L., Xu G. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2010. – Vol. 47, Iss. 3. P.461–468. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.11.003>.
- 67 Bagde M.N., Petroš V. Fatigue properties of intact sandstone samples subjected to dynamic uniaxial cyclical loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2005. – Vol. 42, Iss. 2. P. 237–250. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.08.008>.
- 68 Liu E.L., Huang R.Q., He S.M. Effects of frequency on the dynamic properties of intact rock samples subjected to cyclic loading under confining pressure conditions // Rock Mechanics and Rock Engineering – 2012. – Vol. 45, Iss. 1. P. 89–102. DOI: 10.1007/s00603-011-0185-y.
- 69 Bagde M.N., Petroš V. Waveform effect on fatigue properties of intact sandstone in uniaxial cyclical loading // Rock Mechanics and Rock Engineering – 2005. – Vol. 38, Iss. 3. P. 169–196. DOI: 10.1007/s00603-005-0045-8.

- 70 Xiao J.Q., Ding D.X., Xu G. Waveform effect on quasi-dynamic loading condition and the mechanical properties of brittle materials // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2008. – Vol. 45, Iss. 4. P. 621–626. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.07.025>.
- 71 Firme Pedro A.L.P., Roehl D., Romanel C. An assessment of the creep behaviour of Brazilian salt rocks using the multi-mechanism deformation model // Acta Geotechnica – 2016. – Vol. 11, Iss. 6. P. 1445–1463. DOI: 10.1007/s11440-016-0451-y.
- 72 Носиков А.В., Коротков С.А., Трясин Е.Ю., Торопецкий К.В., Михайлов Б.О., Борисов Г.А. Исследование ползучести каменных солей и применение в инженерных расчетах конструкции скважин // Экспозиция Нефть Газ. – 2018. – №7. – С. 29-36.
- 73 Lin-jian Ma, Xin-yu Liu, Ming-yang Wang, et al. Experimental investigation of the mechanical properties of rock salt under triaxial cyclic loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2013. – Vol. 62. P. 34-41. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.04.003>.
- 74 Титов Б.В. Исследование и разработка метода определения длительной прочности соляных горных пород при сжатии // канд. тех. наук: 05.15.11.- Березники. 1983.- 248 с.
- 75 Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела.- Учеб. Пособие для вузов.- 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1988. – 712с.
- 76 Nazarov L.A., Nazarova L.A., Golikov N.A. Assessment of rheological properties of bazhenov formation by thermobaric test data // Journal of Mining Science – 2017. – Vol. 53, Iss. 3. P. 434-440. DOI: 10.1134/S1062739117032320.
- 77 Nazarov L.A., Nazarova L.A. Estimation of pillar stability based on viscoelastic model of rock mass // Journal of Mining Science – 2005. – Vol. 41, Iss. 5. P. 399-406. DOI: 10.1007/s10913-006-0002-2.
- 78 Nazarov L.A., Nazarova L.A. Method of preparing data for solution of three-dimensional geomechanical problems // Journal of Mining Science – 1997. – Vol. 33, Iss. 3. P. 193-202.

- 79 Кошелев А.Е. Обоснование и разработка метода определения механических свойств каменной соли с учетом начального поля напряжений: диссертация // канд. тех. наук: 25.00.20.- Москва. 2013.- 143 с.
- 80 Gao J., Deng T. Metastable phase equilibrium in the aqueous quaternary system (LiCl + MgCl₂ + Li₂SO₄ + MgSO₄ + H₂O) at 308.15 K. // Journal of Chemical and Engineering Data – 2011. – Vol. 56. P. 1452-1458. DOI: 10.1021/je101171v.
- 81 Thenoux Z.G., Vera A.S. Evaluation of hexahydrated magnesium chloride (Bischofite) performance as a chemical stabilizer of granular road surfaces // Materiales de Construcción – 2002. – Vol. 1819, Iss. 1. P. 5-22. <https://doi.org/10.3141/1819b-06>.
- 82 Shalev N., Lazar B., Köbberich M., Halicz L., Gavrieli I. The chemical evolution of brine and Mg-K-salts along the course of extreme evaporation of seawater – An experimental study // Geochimica et Cosmochimica Acta – 2018. – Vol. 241. P. 164-179. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.09.003>.
- 83 Ligen T., Weiyao Z., Huayin Z., Yan W., Huaquan J., Ping P., Deshu L., Jieming W., Chun L., Ying Y., Ke R., Zhide W., Limin L. Monitoring well pattern deployment in china China gas storage and its initial success rate // Journal of Energy Storage – 2020. – Vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101950>.
- 84 Казарян В.А., Цыбульский П.Г. Технология строительства резервуаров калининградского подземного хранилища газа // Горный журнал. – 2010. – №3. – С. 48-51.
- 85 Гончарова В.В., Ерошкин Д.В., Чемезов И.И., Леченко Г.Е., Волков К.Р., Маслеев А.В. Новые технологии выбора места и оценки соляных структур для подземных хранилищ природного газа // Вестник евразийской науки. – 2020. – №4. – Т. 12. – С. 1-7.
- 86 Ban Fansheng, Xiao Lizhi, Yuan Guangjie & Yang Changlai. Rapid solution mining technology for underground gas storage in salt-caverns and case histories // Natural Gas Industry – 2012. – Vol. 32, Iss. 9. P. 77-79. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2012.09.018.

- 87 Donadei S., Schneider G.-S. Compressed Air Energy Storage in Underground Formations // Storing Energy: With Special Reference to Renewable Energy Sources – 2016. P. 113-133. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00006-3>.
- 88 Zapata Y, Kristensen MR, Huerta N, Brown C, Kabir CS, Reza Z. CO₂ geological storage: Critical insights on plume dynamics and storage efficiency during long-term injection and post-injection periods. J Nat Gas Sci Eng. 2020 Nov 1;83. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103542.
- 89 Mansouri H, Ajalloeian R. Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2018. – Vol. 110. P. 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.07.006>.
- 90 Pedro V.M. da Costa, da Costa A.M., Meneghini J.R., Nishimoto K., Sampaio C.M., Assi G, et al. Parametric study and geomechanical design of Ultra-deep-water Offshore Salt Caverns for Carbon Capture and Storage in Brazil // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2020. – Vol. 131. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104354>.
- 91 Shao H., Wang Y., Nagel T., Kolditz O., Yoshioka K. Determination of permeability for hydrocarbon release due to excavation-induced stress redistribution in rock salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences – 2020. – Vol. 136. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104525>.
- 92 Shafarenko E.M., Smirnov V.I., Oksenkrug E.S., Tavostin M.N., Skvortsova Z.N., Traskin V.Y. Rock salt creep in brine environment // 20th Century Lessons, 21st Century Challenges – 1999. P. 677-680.
- 93 Агеенко В.А., Скворцов А.А. Изучение реологических свойств каменной соли в условиях сверхдлительного одноосного нагружения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – №11. – С. 27-34. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-27-34.
- 94 Ageenko V.A., Tavostin M.N., Vakulenko I.S. Triaxial compression testing of frozen soils for the determination of rheological parameters // Mining science

- and technology – 2017. – No. 3. P. 18-22. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2017-3-18-22>.
- 95 Морозов И.А., Ударцев А.А., Паньков И.Л. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 10. – С. 16–28. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.
- 96 Байков А.С., Носкова Е.И. Определение физико-механических свойств соляных пород скважины № 44 // Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевых солей. – 2018. – С. 109-122.
- 97 Аптуков В.Н., Скачков А.П., Константинова С.А. Микромеханические свойства карналлита, сильвинита и каменной соли верхнекамского месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. - №4. – С. 13-20.
- 98 Luangthip A., Wilalak N., Thongrapha T., Fuenkajorn K. Effects of carnallite content on mechanical properties of Maha Sarakham rock salt // Arabian Journal of Geosciences – 2017. – Vol. 10, Iss. 6. DOI: 10.1007/s12517-017-2945-9.
- 99 Пестренин В.М., Пестренина И.В., Мерзляков А.Ф. Ползучесть образцов каменной соли в опытах на сжатие // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – С. 119-124.
- 100 Барях А.Б., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения // Пермский государственный технический университет. – П.: ПГТУ, 2008. – 199 с.
- 101 Константинова С.А., Ваулина И.Б., Ильинов М.Д. Некоторые результаты испытаний образцов соляных пород на ползучесть // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2008. – №2. – С. 118-122.
- 102 Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб.: Наука, 2001. – 344 с.

- 103 Wu C., Liu J., Zhou Z., Xu H., Wu F., Zhuo Y., Wang L. Study on creep properties of salt rock with impurities during triaxial creep test // Gongcheng Kexue Yu Jishu. Advanced Engineering Science – 2017. – V. 49. P. 165-172. DOI: 10.15961/j.jsuese.201600854.
- 104 Singh. D.P. Long-term strength of rock // Colliery Guardian – 1977. – Vol. 225, Iss. 11. P. 861-866
- 105 Проскуряков Н.М., Ливенский В.С., Карташов Ю.М. Реологические свойства соляных пород // Развитие калийной промышленности: Обзорная информация. – М.: НИИТЭХим, 1974. – 48 с.
- 106 Вялов С.С. Закономерности длительной прочности грунтов // В кн.: Труды к УП международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению. – Москва. – 1969. – С. 56-65.
- 107 Вялов С.С., Городецкий С.Э., Ермаков В.Ф. и др. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мёрзлых грунтов. – М.: Наука, 1966. – 132 с.
- 108 Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород // Углетехиздат. – Москва, 1947. – 180 с.
- 109 Тавостин М.Н. Обоснование и разработка методов определения реологических параметров каменной соли для оценки устойчивости подземных хранилищ // канд. тех. наук: 25.00.20. – Москва, 2001. – 157 с.
- 110 Ильинов М.Д., Карташов Ю.М. Ускоренный метод определения реологических свойств горных пород // Записки Горного института. – 2011. – С. 207-209.
- 111 Тавостин М.Н. Влияние вида напряженного состояния на реологические свойства каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. – №8. – С. 125-128.
- 112 Su-min Zhang, Yong-quan Zhu. Deformation Mechanism of Water-rich Soft Rock Tunnel // Electronic Journal of Geotechnical Engineering – 2016, (21.22). P. 6951-6962.

- 113 Abedi F, Moosavi M, Bahroudi A, Moazenian A. Effect of solid impurity on creep behavior of salt rocks of the Hormoz formation // International Journal of Mining and Geo-Engineering – 2020. – Vol. 54. P. 161 – 166. DOI: 10.22059/IJMGE.2019.276823.594787.
- 114 Wang J., Zhang Q., Song Z., Zhang Y. Creep properties and damage constitutive model of salt rock under uniaxial compression // International Journal of Damage Mechanics – 2020. Vol. 29, Iss. 6. P. 902-922. DOI: 10.1177/1056789519891768.
- 115 Оловянный А.Г. Некоторые задачи механики массивов горных пород. – СПб.: ФГУП «Межотраслевой научный центр» ВНИМИ, ООО «Стресс», 2003. – 234 с.
- 116 Olovyannyu A., Chantsev V. Numerical experiments concerning long-term deformation of rock samples // Mining of Mineral Deposits – 2019. – Vol. 13, Iss. 4. P. 18-27. DOI: 10.33271/mining13.04.018.
- 117 Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.
- 118 Svetlana Lerche. Kriech- und Schädigungsprozesse im Salinargebirge bei mono- und multizyklischer Belastung: dissertation zur erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften. Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal. 2012.
- 119 Liu, J., Pu, S., Rao, J. Visco-Elastoplastic Constitutive Fatigue Model for Rocks // Advances in Civil Engineering – 2020. – Vol. 2020. DOI: 10.1155/2020/4292043.
- 120 Хлопцов В.Г. Оценка устойчивости подземных резервуаров // Газовая промышленность. – 2002. – № 2. – С. 70-73.
- 121 **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.

- 122 ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1984. – 10 с.
- 123 ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. – 14 с.
- 124 ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. – 15 с.
- 125 ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1988. – 15 с.
- 126 **Осипов Ю.В.**, Кошелев А.Е. Построение паспортов прочности соляных горных пород с использованием графической среды Corel Draw // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – №7. – С. 393-396.
- 127 **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.
- 128 **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.
- 129 **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.
- 130 **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.
- 131 **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.
- 132 **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.
- 133 **Osipov Yu.V.** 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/kvst6h4zv8/1>.
- 134 **Осипов Ю.В., Вознесенский А.С.** Программа для расчета и построения кривых ползучести горных пород при заданном напряжении В-Среер, версия 1.0. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2022667656. Заявка № 2022666434, 06.09.2022. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 23.09.2022.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Справка о внедрении полученных результатов в ООО «Газпром геотехнологии»

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. генерального директора

ООО «Газпром геотехнологии»

А.А. Скворцов

» марта 2023 г.



СПРАВКА

Настоящая справка дана в том, что все полученные в рамках диссертационной работы **Осипова Юханны Владимировича** «Определение прочностных, деформационных и реологических свойств бишофитовой породы в условиях одноосного и трехосного напряженного состояния» результаты 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-Creep, версия 1.0» переданы для внедрения в ООО «Газпром геотехнологии».

Полученные результаты будут применены при планировании и проведении экспериментальных исследований механических свойств соляных пород, характеристики которых необходимы при проектировании и строительстве в отложениях каменной соли Волгоградского, Калининградского, Ангарского подземных хранилищ газа, при разработке Чаяндинского ГКМ, а также для расчётов устойчивости подземных сооружений, создаваемых в массивах соляных и, в том числе, бишофитовых пород.

Директор инженерно-технического
центра, к.т.н.

Ю.Л. Филимонов

Начальник испытательного
лабораторного центра, к.т.н.

А.Е. Кошелев