

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»**

На правах рукописи

Агеенко Валерий Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЭКСПРЕСС-МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛЗУЧЕСТИ КАМЕННОЙ СОЛИ**

**Специальность 25.00.20 - «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент кафедры ФизГео
Скворцов Алексей Александрович**

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Методы изучения реологических свойств горных пород	8
1.1 Общие сведения о подземном хранении газа в каменных солях	8
1.2 Условия пригодности месторождений каменной соли для сооружения подземных резервуаров.	10
1.3 Специфика сооружения подземных резервуаров газа в каменной соли	12
1.4 Оценка устойчивости.....	14
1.4 Деформационные свойства необходимые для расчета устойчивости...	16
1.5 Прочностные свойства необходимые для расчёта устойчивости	17
1.6 Реологические характеристики необходимые для расчёта	20
1.6.1 Определение параметров ползучести	20
1.7 Изученность реологических свойств	23
1.7.1 Прямой метод	24
1.7.2 Косвенные методы	26
Выводы и постановка задачи исследований	35
Глава 2. Одноосные испытания	37
2.1 Подготовительная работа с керновым материалом.....	37
2.2 Описание оборудования для проведения испытаний.....	38
2.3 Ступенчатое нагружение.....	41
2.3.1 Обоснование величины времени на каждой ступени при проведении экспериментов в режиме ступенчатого нагружения	47
2.3.2 Обоснование величины напряжения на ступени при проведении экспериментов в режиме ступенчатого нагружения	57
2.4 Математическое описание испытаний методом ступенчатого нагружения.....	72
Выводы к главе 2:.....	78
Глава 3. Трехосные испытания	80
3.1 Описание оборудования для проведения экспериментов.....	80
3.2 Методика проведения испытаний в режиме длительно нагружения прямым методом.....	88

3.3 Анализ результатов проведения экспериментов в режиме длительного нагружения прямым методом и методом	91
3.3 Описание параметров ступенчатого нагружения	98
3.4 Анализ результатов проведения экспериментов в режиме длительного нагружения методом ступенчатого нагружения.....	100
Выводы к главе 3:.....	118
Глава 4. Методика проведения испытаний каменной соли методом ступенчатого нагружения в условиях одноосного и трехосного сжатия.....	119
4.1. Общие положения	119
4.2. Условные обозначения	119
4.3. Выбор величины нагружения	120
4.3.1. Метод ступенчатого нагружения в условиях одноосного сжатия	121
4.3.2. Метод ступенчатого нагружения в условиях трехосного сжатия	121
4.4. Результаты экспериментов.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	127

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Каменная соль является не только чрезвычайно важным полезным ископаемым, но и вмещающей геосредой средой для размещения подземных резервуаров (ПР) различного назначения. Создание ПР в соляных массивах, в большинстве случаев осуществляется скважинным методом, что обусловлено растворимостью и большими глубинами соляных отложений, сложными горно-геологическими условиями их залегания. Сооружаемые указанным методом подземные резервуары ПР широко используются для подземного хранения (ПХ) различных флюидов. Так на территории России созданы объекты в каменной соли для хранения природного газа, нефтепродуктов, гелиевого концентрата, сжиженных углеводородов и т.д. Эксплуатация объектов ПХ, которые, как правило, относятся к опасным, длится десятилетиями, в связи с чем особое внимание уделяется их надёжности и устойчивости. Принятие управленческих и технических решений при проектировании и строительстве ПР в массивах каменной соли базируется на изучении её физико-механических свойств, и в частности, присущих ей реологических характеристик. Достоверность и представительность данных об этих характеристиках во многом определяет эффективность разработки соляных месторождений и эксплуатации объектов ПХ. Традиционный метод определения реологических параметров каменной соли предполагает проведение на прессовом оборудовании большой серии длительных непрерывных деформационных испытаний образцов при различных нагрузках в лабораторных условиях. Причём, такие испытания необходимо проводить отдельно для каждой литолого-генетической группы соляных пород. Кроме того, значительные сложности, материальные и временные затраты связаны со скважинным отбором достаточно качественного и многочисленного кернового материала. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является обоснование и разработка методики реологических испытаний каменной соли, обеспечивающей

сочетание высокой скорости и точности определения параметров ползучести за счёт оптимального выбора режимов ступенчатого нагружения образцов.

Цель работы заключается в установлении закономерностей поведения каменной соли при её испытаниях методом ступенчатого нагружения в условиях одноосного и трёхосного сжатия и обосновании на этой основе оптимальных значений количества и длительности ступеней нагружения, обеспечивающих требуемую точность и минимизацию времени определения параметров ползучести.

Идея работы заключается в проведении сравнительного анализа результатов определения реологических свойств каменной соли традиционным прямым методом длительных непрерывных испытаний и методом ступенчатого нагружения при различных режимах его реализации, а также последующем использовании данных этого анализа для оптимизации указанных режимов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Минимизация времени определения характеристик ползучести каменной соли методом ступенчатого нагружения при сохранении высоких показателей точности, характерных для прямого метода длительных непрерывных испытаний, может быть обеспечена за счёт оптимального выбора количества и длительности ступеней нагружения испытываемых образцов.

2. Для получения достоверных сведений об установившейся скорости деформации образцов каменной соли в условиях ступенчатого одноосного и трёхосного сжатия, согласующейся со скоростью деформации при испытаниях прямым методом, необходимое и достаточное время нахождения образца под нагрузкой на каждой ступени составляет 48 часов.

3. Минимальное количество ступеней нагружения при одноосном и трёхосном ступенчатом испытании образцов каменной соли для определения скорости деформации с погрешностью не более 15 % от данных, полученных прямым методом, должно быть равно шести.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: корректностью постановки задачи исследования; представительным объёмом экспериментальных исследований реологических свойств каменной соли с использованием традиционного прямого метода и метода ступенчатых испытаний; удовлетворительной воспроизводимостью и сходимостью полученных указанными методами результатов; использованием при проведении экспериментальных исследований поверенного и сертифицированного оборудования с высокими метрологическими характеристиками.

Методы исследований включают: анализ научно-технической информации и накопленного опыта проведения лабораторных исследований, и применения реологических моделей для соответствующих геомеханических расчетов; экспериментальные исследования на образцах каменной соли с использованием различных методов и режимов их нагружения и последующий теоретический анализ их результатов.

Научная новизна исследований заключается:

- в установлении оптимального количества ступеней при проведении реологических испытаний образцов каменной соли при одноосном и трехосном нагружении;
- в установлении закономерностей изменения скорости деформации каменной соли в зависимости от продолжительности каждой ступени нагружения при одноосном и трехосном нагружении;
- в установлении аналитической зависимости между продольными деформациями каменной соли при одноосном нагружении и изменяющейся во времени действующей нагрузкой;
- в установлении коэффициентов степенного закона ползучести, описывающего скорость интенсивности деформаций от действующей интенсивности напряжений и времени в условиях трёхосного испытания образцов.

Практическая значимость и реализация результатов В рамках диссертационной работы обоснована и разработана «Методика определения реологических параметров каменной соли методом ступенчатого нагружения» позволяющая достоверно оценивать указанные параметры с минимальными трудовыми и временными затратами. Методика передана в ООО «Газпром геотехнологии», которым используется при проведении инженерно-геологических изысканий в районах строительства и эксплуатации подземных хранилищ газа.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на научных симпозиумах «Неделя горняка» (НИТУ «МИСиС», Москва 2018-2020 гг.); на XII и XIII Всероссийских конференциях «Новые технологии в газовой промышленности» (РГУ нефти и газа им И. М. Губкина, Москва 2017 и 2019 гг.); на VIII Молодежной международной научно-практической конференции «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (Газпром ВНИИГАЗ, Москва 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, в том числе 3 – в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, из которых 2 индексируются в базах данных Scopus.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 85 источников, содержит 81 рисунок и 21 таблицу.

Глава 1. Методы изучения реологических свойств горных пород

1.1 Общие сведения о подземном хранении газа в каменных солях

Современные проблемы стран в энергетической и экономической области тесно связаны между собой. Экономическая стабильность во многом зависит от топливно-энергетической составляющей, которую в настоящее время в большей степени представляют газ, нефть и продукты их переработки. Доля альтернативной энергетики даже в самых развитых странах не превышает 20%. В настоящее время в РФ создана единая система газоснабжения, которая представляет собой производственно-технологический комплекс, состоящий из объектов добычи, переработки, транспорта, хранения и использования газа. Неотъемлемой частью единой газовой системы является хранилища газа. Эти уникальные объекты строительства позволяют сохранять стратегические запасы газа и контролировать стабильность поставок газа потребителю. Добыча газа происходит практически равномерно в течение всего года, а потребление колеблется и в значительной мере зависит климатических условий. Для России отличительной особенностью является неравномерный характер потребления газонефтепродуктов. Самыми крупными колебаниями являются сезонные колебания, это связано с резко различающимися климатическими условиями в течение года. В связи с неравномерностью потребления газа хранение газа имеет большое значение в нашей стране. График сезонного потребления газа представлен на рисунке 1.1. На рисунке за абсолютный ноль принято значение среднего потребления газа. В «+» показания увеличения потребления газа от среднего за год, в «-» - уменьшение от среднего потребления за год.

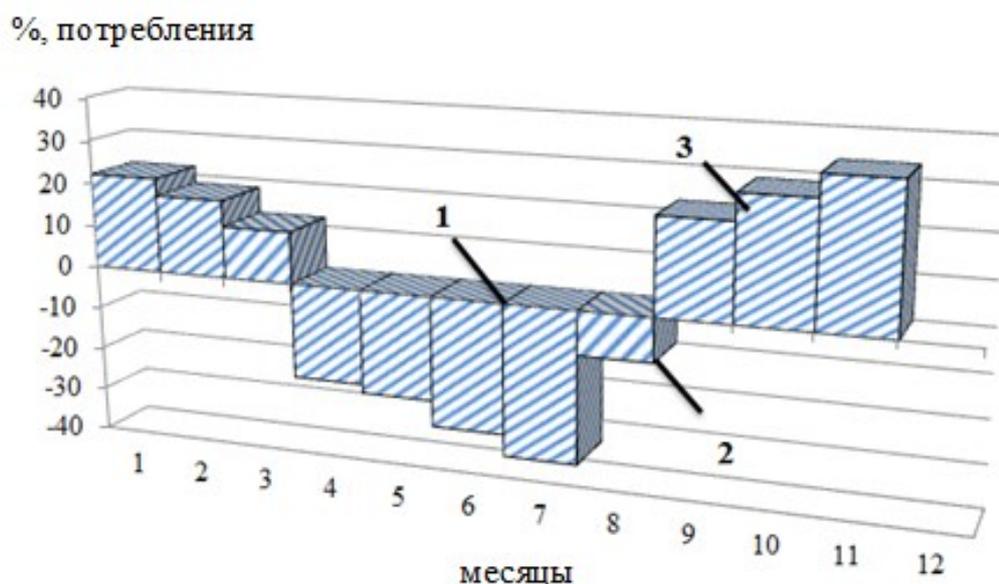


Рисунок 1.1 - Сезонный (годовой) график потребления газа: 1 - уровень среднегодовой подачи газа; 2 - область низкого газопотребления; 3 - область высокого газопотребления. [34].

В настоящее время развито строительство надземных и подземных хранилищ углеводородов. Среди подземных хранилищ на сегодняшний день эксплуатируются такие типы как: хранилища газа в пористых пластах (истощенных месторождениях и водоносных пластах); хранилища в каменной соли, создаваемые методом скважинного выщелачивания; подземные хранилища шахтного типа в непроницаемых устойчивых горных породах; подземные хранилища в многолетнемерзлых породах.

Это далеко не полный список существующих хранилищ, но наибольший интерес для данной работы представляют собой хранилища в отложениях каменной соли.

Основным преимуществом строительства подземных хранилищ в каменной соли является не только низкая проницаемость и низкое содержание влаги, но возможность использования высокотехнологичных способов строительства. Кроме этого пласты каменной соли обычно перекрыты такими породами как ангидриды и доломиты. Для таких пород характерна низкая проницаемость, в следствии чего они являются естественными водо- и газоупорами. Потери газа в отличие от хранилищ газа

в пористых пластах минимальны. Основными преимуществами ПХГ являются:

- высокая герметичность, вследствие предельных экранирующих свойств каменной соли;
- высокая производительность скважин и ПХГ, вследствие большого диаметра скважин;
- отсутствие необходимости ежегодного глубокого отбора газа из подземного хранилища во избежание растекания газа по латерали;
- возможность работы ПХГ в пиковом режиме и мультициклическом режиме, т.е. обеспечивать максимальный дебит и неограниченное количество этапов закачки и отбора газа без привязки к осенне-зимнему периоду.

На сегодняшний день в мире создано свыше 70 подземных хранилищ газа в каменной соли [1] с общим объемом более 30 млрд м³. Наибольшее распространение ПХГ получили в таких странах как США, Германия, Франция, Великобритания, Канада, Китай и Россия.

1.2 Условия пригодности месторождений каменной соли для сооружения подземных резервуаров.

Территория России в геологическом отношении обладает довольно большим потенциалом для строительства хранилищ в каменной соли. На ее территории расположено 15 площадей и бассейнов. [34]

Строительство в формациях каменных солей актуально не только для нашей страны. На сегодняшний день разведано 20 соленосных бассейнов по территории РФ, четыре из которых – Двинско-Сухонский, Волго-Эмбинский, Хатангский и Ангаро-Ленский имеют площадь свыше 100 тыс. км². Запасы каменной соли разведанных месторождений составляют свыше 100 млрд. тонн [1]. Каменная соль встречается на всех континентах планеты кроме Антарктиды. В истории Земли выделены семь эпох солеобразования начиная с нижнего кембрия. Данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Главные эпохи соленакопления [2]

Период	Абс. Возраст, Длительность млн. лет	Запасы соли 10^{15} т	Главные районы соленакопления
Кембрий	$\frac{570-540*}{20-30}$	3	Восточно-Сибирский, Ирано-Пакистанский, Канада, Австралия
Девон	$\frac{405-380*}{30-40}$	4	Северо-Сибирский, Западно-Канадский, Припятско-Днепровско-Донецкий
Пермь	$\frac{270-230*}{40}$	6-10	Прикаспийский, Средне-Европейский, Северо-Американский
Триас	$\frac{230-210*}{20}$	1	Среднеазиатский (Амударьинский)
Юра	$\frac{155-140*}{15}$	1	Габонский
Мел	$\frac{120-105*}{15}$	0,4	Месопотамский
Миоцен	$\frac{15-15*}{10}$	0,4	

Месторождения отличаются друг от друга и каждое имеет свой геологический возраст, морфологию соляных тел, мощность и глубину залегания, тектонику и минеральный состав а так же гидрогеологические условия. Глубина залегания пород на территории РФ в основном колеблется от 250 до 2500 м. [2]. Образование каменной соли происходит в процессе осадконакопления и как следствие ее относят к осадочной горной породе. Породообразующим минералом является галит (NaCl). Кроме породообразующего минерала так же могут присутствовать ангидриты, глинистое вещество, калийно-магниевые соли, карбонаты, жидкие и газообразные включения. Часть месторождений представлены штоками и куполами, где мощность составляет сотни метров. Другая часть представляет собой пластовые залежи и линзы вздутия, мощность таких месторождений колеблется от нескольких метров до сотен метров.

1.3 Специфика сооружения подземных резервуаров газа в каменной соли

При строительстве резервуаров путем растворения в каменной соли происходит изменение напряженно деформированного состояния в массиве. Изменение напряженно-деформированного состояние оказывает влияние на изменение объема выработанного пространства [4,69]. Так как каменная соль склонна к ползучести, во время эксплуатации происходит конвергенция (уменьшение объема резервуара). В связи с этим в подземных хранилищах во время эксплуатации всегда находится буферный газ, который создает противодействие на его стенки.

Минимальное противодействие хранимого продукта в резервуаре в соответствии с нормативно-технической документацией принимается из расчета [4]:

$$P_{min} = \gamma_f \cdot \rho_r \cdot g \cdot H - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{c+l}{c} \cdot \sigma_i^\infty, \text{ Па} \quad (1.1)$$

$\gamma_f = 0,85$ – коэффициент надежности по нагрузке, согласно СП, п. 3.1 [4], для купольных месторождений $\gamma_f = 0,75$;

ρ_r – средняя плотность вышележащих горных пород, кг/м³

H – расстояние от поверхности земли до кровли выработки емкости, м;

c и σ_i^∞ – параметры реологических характеристик каменной соли;

l – пролет кровли выработки емкости, определяется по формуле [4]:

$$l = \sqrt[3]{\frac{V_{adm}}{V_r}}, \text{ м} \quad (1.2)$$

V_{adm} – допустимый объем области запредельного деформирования в окрестности кровли, где значение ε_i превысило ε_i^∞ , м³;

V_r – значение объема области запредельного деформирования в окрестности кровли резервуара при $l=1$ м, рассчитывается по формуле [4]:

$$V_r = a \cdot \left(\gamma_f \cdot \frac{\rho_r \cdot g \cdot H - P_e}{\sigma_i^\infty} \right)^\beta, \text{ м}^3 \quad (1.3)$$

α и β – безразмерные параметры, значения которых приведены в таблице 1.1 в зависимости от безразмерной величины σ , определяемой по формуле [4]:

$$\sigma = \frac{l}{l - 0.0095/e_i^\infty} \quad (1.4)$$

Таблица 1.1 – Безразмерные параметры α и β [4]

h/l	σ	$\alpha \cdot 10^5$	β
3 и более	1,10	29,60	4,80
	1,07	19,10	5,13
	1,04	4,90	6,19
1	1,10	22,30	4,63
	1,07	10,00	5,32
	1,04	1,10	7,23
1/3	1,10	4,50	6,41
	1,07	1,50	7,34
	1,04	0,72	7,37

Важную роль при строительстве играет выбор глубины заложения, так как с ростом глубины возрастают нагрузки, что приводит к необходимости повышения давления буферного газа. С другой стороны при неглубоком заложении подземных резервуаров максимальное давление во избежание гидроразрыва пород также будет занижено, что приведет к уменьшению хранимого общего и активного объема газа. Давление для хранимого активного газа рассчитывается по формуле [4]:

$$P_{max} - P_{min} = (\gamma_f - 1) \cdot \rho_r \cdot g \cdot H + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{c+l}{c} \cdot \sigma_i^\infty, \text{ Па} \quad (1.5)$$

Достаточно высокая прочность каменной соли позволяет строить подземные резервуары большого объема. Наличие большого объема и высокого давления позволяет хранить большое количество активного газа.

Максимальное допускаемое определяется [4] по формуле.

$$P_{max} = \gamma_f \cdot \rho_r \cdot g \cdot (H - \alpha), \text{ Па} \quad (1.6)$$

где γ_f – коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый в расчёте:

0,85 – при спокойном или пластово-линзообразном залегании соли, когда надсолевая толща представлена непроницаемыми породами, что соответствует данному расчету;

0,75 – в остальных случаях;

ρ_r – плотность вышележащих горных пород, кг/м³;

H – расстояние от поверхности земли до кровли выработки-емкости, м;

α - длина необсаженного участка скважины, м.

1.4 Оценка устойчивости

Оценку устойчивости породного массива, вмещающего подземную выработку, возможно проводить методом конечных элементов, реализованным в различных программных комплексах. Одним из таких программных комплексов является Abaqus. [50]

Abaqus реализует метод конечных элементов. Первый шаг построения любого конечно-элементного анализа - это дискретизация геометрической модели сравнительно сложной формы на конечные элементы. Каждый конечный элемент являет собой некоторую часть общей геометрической модели, которая имеет относительно простую форму, в пределах которой и ищется решение. Совокупность решений в каждом конечном элементе дает общее решение для всей модели. Конечные элементы соединяются с помощью узлов. Сочетания узлов и конечных элементов называют сеткой. Плотность сетки зависит от количества элементов.

Основной переменной в методе конечных элементов является узловое перемещение. После определения перемещений можно получить деформации в элементе, дальше, используя зависимости между деформациями и напряжениями, можно найти поля распределения напряжений.

В случае решения объемных задач, вся расчетная область разбивается на конечные элементы, где на границах расчетной модели задаются граничные и кинематические условия, а в каждом узле конечного элемента

рассчитываются напряжения и деформации. В результате расчетов определяются все компоненты тензоров напряжений и деформаций во всех конечных элементах. На основании этих данных в окрестности контура выработки-емкости находится некоторая область, где уровень деформаций ползучести превышает некую критическую величину. Такая область называется областью запредельного деформирования (ОЗД). [4] Затем полученные значения сопоставляются с предельно допустимыми величинами, задаваемыми принятыми критериями устойчивости.

Каменная соль под нагрузкой с течением времени имеет особенность изменять свои деформационные и прочностные характеристики. Во многом это связано с изменением напряжений в массиве. Напряженно-деформированное состояние с течением времени изменяется, так как у соли хорошо прослеживаются реологические свойства. Способность каменной соли изменять во времени напряженно-деформированное состояние в поле действия механических сил и называется ее реологическими свойствами. [31]

Поэтому одной из основных задач при строительстве резервуаров является расчет их длительной устойчивости. В связи с этим актуальным вопросом является изучение физико-технических свойств каменной соли. И особую роль стоит уделять изменению свойств во времени, так как расчет устойчивости резервуара производится на длительный период его эксплуатации с изменчивой нагрузкой. Срок эксплуатации подземных резервуаров соответствует не менее 30 лет. [4]

В связи с вышесказанным при оценке устойчивости используют различные расчётные модели. В связи с этим необходимо изучение различных физико-механических свойств каменной соли, необходимые для моделирования. [36, 42, 50].

1.4 Деформационные свойства необходимые для расчета устойчивости

Деформационные свойства в расчёте устойчивости играют не маловажную роль. Основной характеристикой является модуль упругости и модуль деформации, [6] связывающий напряжения и деформации. В момент быстрого нагружения образца каменной соли, образец проявляет упругие и пластические свойства. В момент, когда образец проявляет упругие свойства, коэффициент E принимает значение модуля упругости, а коэффициент μ принимает смысл коэффициента Пуассона. В момент, когда начинают проявляться неупругие деформации, коэффициентом E является модуль деформации.

Метод определения модуля деформации E соляных пород представлен в ГОСТ 28985-91 [5]. На рисунке 1.2 представлен пример полной диаграммы деформирования [83], связывающий между собой напряжения на образец и его продольные и поперечные деформации. Отношение осевого напряжения к относительной продольной деформации является модулем общей деформации E . Определяется по формуле [5]:

$$E_D = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\sigma_{1к} - \sigma_{1н}}{\varepsilon_{1к} - \varepsilon_{1н}}, \text{ Па} \quad (1.7)$$

Отношение поперечной деформации к продольной на упругом участке деформирования является коэффициентом Пуассона ν , который определяется по формуле [5]:

$$\nu = \frac{\Delta\varepsilon_3}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_{3к} - \varepsilon_{3н}}{\varepsilon_{1к} - \varepsilon_{1н}}, \text{ Па} \quad (1.8)$$

где $\sigma_{1к}$, $\sigma_{1н}$ – осевые напряжения в конце и начале диапазона нагружения или разгрузки, Па;

$\varepsilon_{1к}$, $\varepsilon_{1н}$ – относительные продольные деформации в конце и начале диапазона при нагружении.

Для наглядности представления был проведен эксперимент на образце каменной соли Калининградского месторождения.

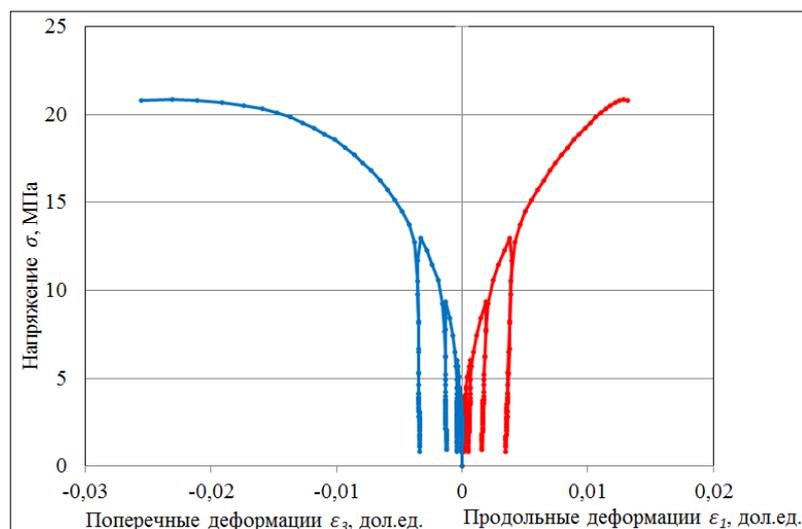


Рисунок 1.2 – Полная диаграмма деформирования образца Калининградского месторождения каменной соли, полученная в лабораторных условиях.

В работе [6] установлено, что при переходе от одноосного сжатия к объемному сжатию прослеживается количественное увеличение значений модуля деформации E_d , модуля упругости E_y и коэффициента Пуассона ν .

1.5 Прочностные свойства необходимые для расчёта устойчивости

Существуют различные теории прочности материалов, но в механике горных пород наибольшее распространение получила теория прочности О. Мора [7]. Данная теория была подтверждена экспериментально Т. Карманом. Согласно данной теории разрушение материала происходит не от касательных τ или нормальных σ напряжений, а от некоторой их комбинации. Разрушение происходит тогда, когда на некоторой площадке образуется самая неблагоприятная комбинация касательных τ или нормальных σ напряжений.

Для дальнейшего понимания схем нагружения на образец приняты следующие условные обозначения напряжений, создаваемые по перпендикулярным площадкам как $\sigma_z, \sigma_x, \sigma_y$ или $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. В работе

рассматриваются только главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Напряжения и деформации сжатия принимаются положительными [6].

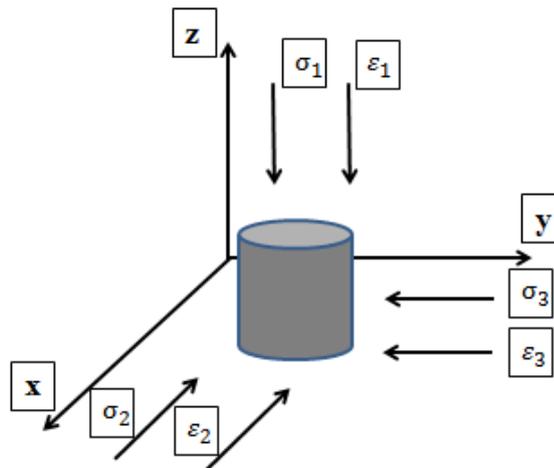


Рисунок 1.3 – Схема обозначения главных напряжений и деформаций

В настоящее время принято напряженные состояния сжатия классифицировать по 3 видам [31,63,74]:

1. Одноосное $\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, (рисунок 1.4 а);
2. Двухосное $\sigma_1 > k \cdot \sigma_2, \sigma_3 = 0$, (рисунок 1.4 б);
3. Трехосное или объемное (рисунок 1.4 в, г, д).

Ниже приведены виды напряженного состояния: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ (равнокомпонентное поле напряжений), $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ (схема Т. Кармана – трехосное сжатие), $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ (схема Беккера - трехосное растяжение) [72].

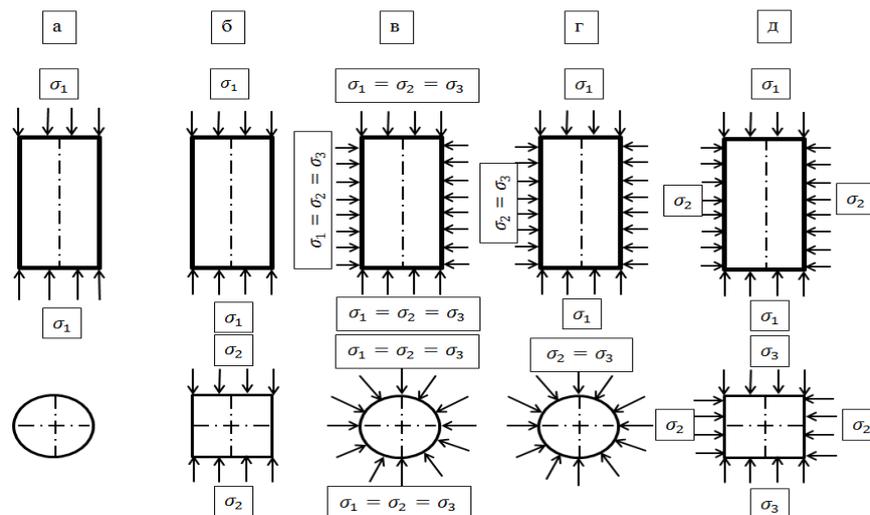


Рисунок 1.4 – Схемы испытания образцов при разном напряженном

состоянии [31]

По результатам проведения исследований по схемам нагружения Т. Кармана строятся круги Мора в координатах нормальных σ и касательных τ напряжений. Кривая, огибающая предельные круги Мора является Паспортом прочности горной породы. Предельный круг Мора соответствует предельному напряженному состоянию, достигаемому при данном соотношении σ_{\max} и наименьшего σ_{\min} главных нормальных напряжений, и имеет радиус $R = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$ с координатами центра $\left(\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; 0\right)$ [7]. На рисунке 1.5 представлена огибающая кривая наиболее характерных предельных кругов Мора.



Рисунок 1.5 –. Пример паспорта прочности каменной соли, полученный в лабораторных условиях [6]

Уравнение огибающей кривой О. Мор предложил записывать в следующем виде [7]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c + f\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right), \quad (1.9)$$

где c – коэффициент сцепления, напряжение сдвига при нормальном напряжении $\sigma = 0$;

f – функция, определяемая экспериментальным путем.

Для упрощения представления результата и определения прочностных параметров в координатах $(\sigma - \tau)$ выбирают точки соответствующие

различным напряженным состояниям и по ним криволинейную огибающую заменяют прямой линией [7]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos(\varphi)} = c + \operatorname{tg}(\varphi) \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \quad (1.10)$$

где φ – угол наклона прямолинейной огибающей к оси σ .

1.6 Реологические характеристики необходимые для расчёта

Большое распространение в области расчётов подземных сооружений в породных массивах с ярко-выраженными реологическими свойствами получило уравнение ползучести Нортона-Бейли [27, 36, 50, 68]:

$$\dot{\varepsilon}^c = A \cdot (\bar{\sigma}^c)^n \cdot t^m \quad (1.11)$$

где $\dot{\varepsilon}^c$ – скорость деформации в условиях объемного нагружения;

$\bar{\sigma}^c$ – действующее напряжение;

t – время, с;

A , n и m – параметры, определяемые из экспериментов на ползучесть в условиях трехосного сжатия [36, 40, 41, 50, 82].

1.6.1 Определение параметров ползучести

Величина A из уравнения (11) определяет величину предельной скорости деформаций ползучести на интервале при постоянном напряжении. Характер ее поведения представлен на рисунке 1.6.

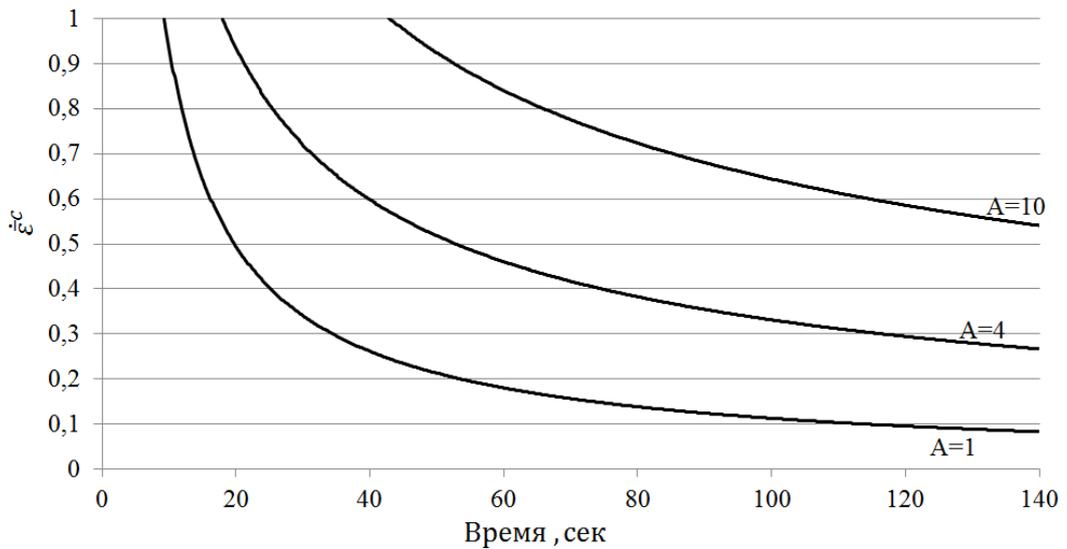


Рисунок 1.6 – Графические зависимости параметра ползучести A [50] на фиксированном участке

Коэффициент n определяет нелинейную зависимость между начальной скоростью и напряжением. Величина $-1 \leq m \leq 0$ определяет скорость “упрочнения” материала [50] Зависимость коэффициента m от скорости деформирования отражена на рисунке 1.7.

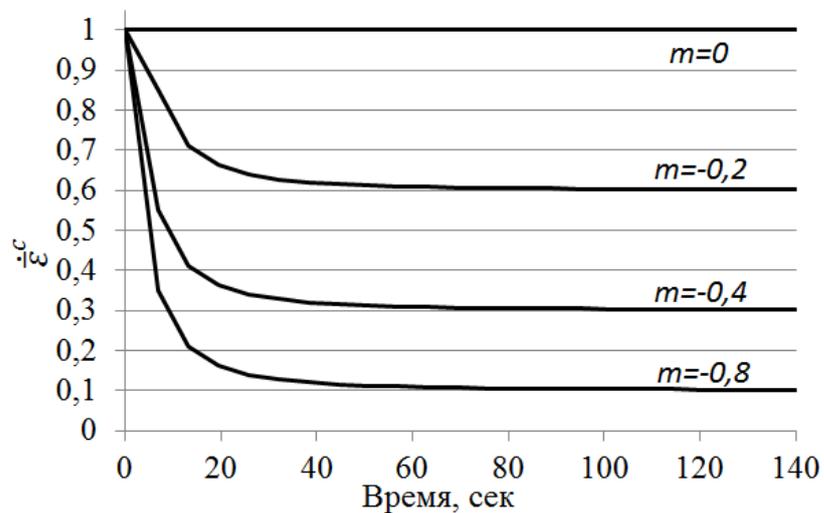


Рисунок 1.7 – Зависимость коэффициента m от скорости деформирования[50]

Определение параметров модели ползучести A , n и m производится на основании обработки данных трехосных испытаний исследуемой каменной соли на ползучесть в лабораторных условиях [70,75]. Основой для их расчёта

являются кривые ползучести. Для наглядности результатов были проведены эксперименты на образцах каменной соли с разным осевым напряжением, данные представлены на рисунке 1.8. Синяя линия при осевом напряжении $\sigma_1=21$ МПа, зеленая при напряжении $\sigma_1=28$ МПа. Боковое напряжение в обоих случаях составляло $\sigma_3=8$ МПа.

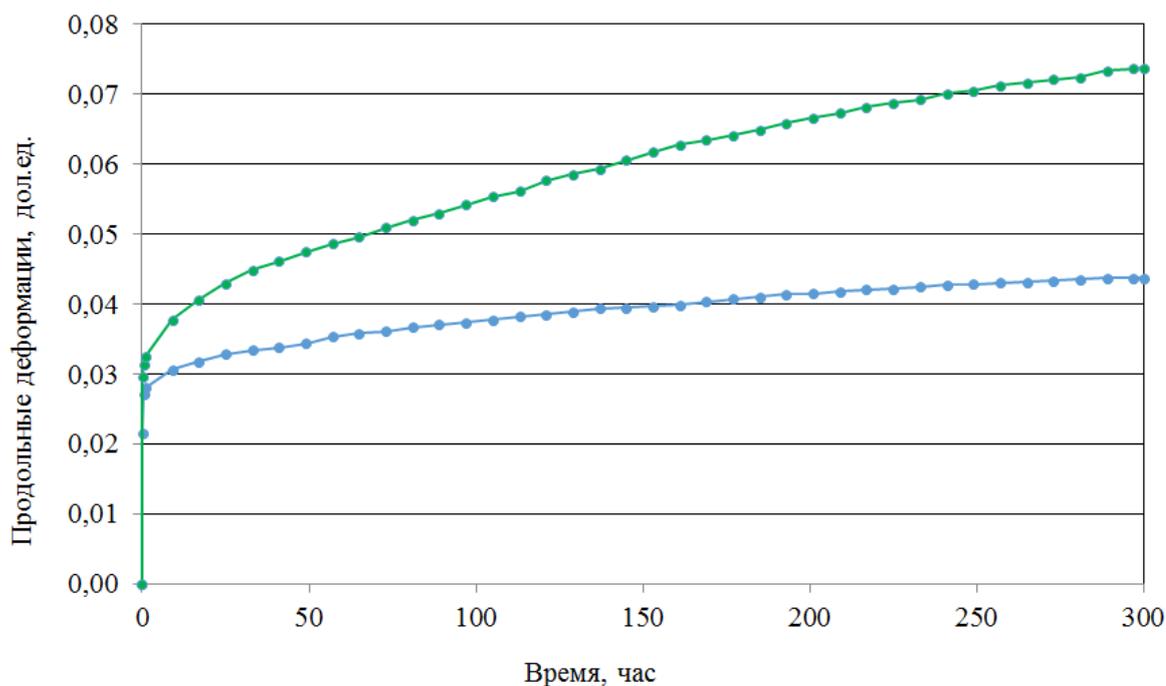


Рисунок 1.8 – Характерный график ползучести образцов каменной соли.

По данным ползучести в ходе эксперимента по формуле (1.11) рассчитываются скорости (второй инвариант тензора напряжений) деформирования [50].

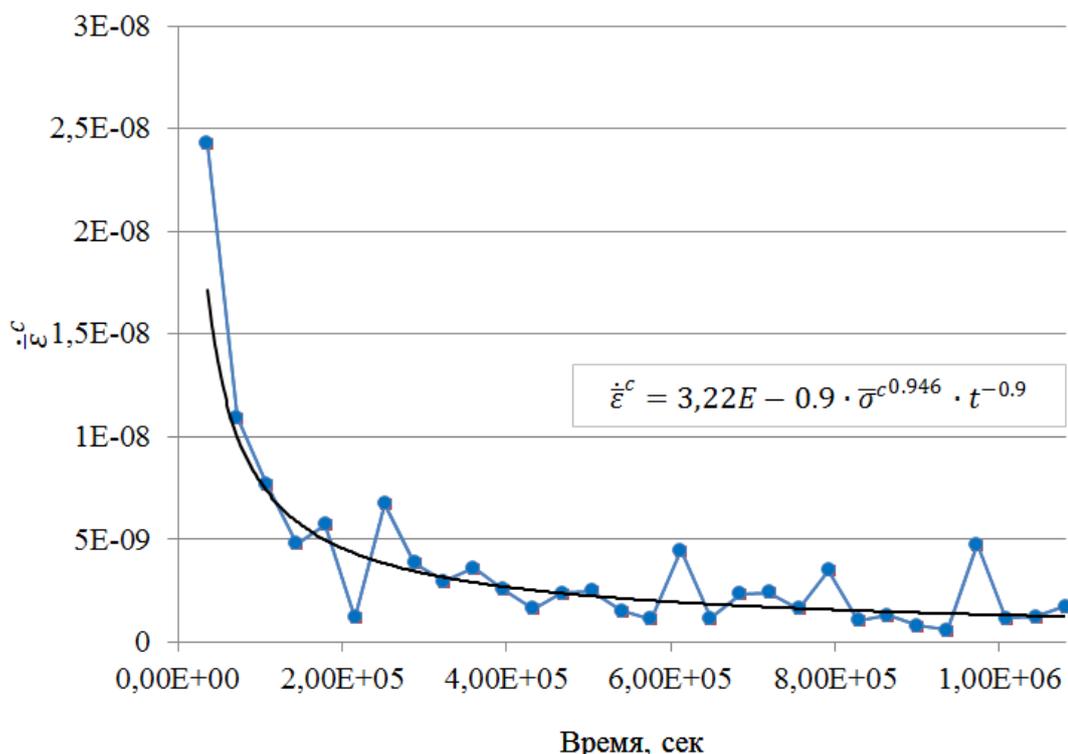


Рисунок 1.9 – Характерный график определение параметров ползучести A , n и t для каменной соли.

На рисунке выше приведен пример регрессивного анализа результатов лабораторных испытаний образцов каменной соли согласно уравнению (1.11), параметры $A=3,22 \cdot 10^{-9}$, $n=0,946$, $t=-0,9$. Коэффициент корреляции составил $r=0,96$.

Исходя из вышесказанного, мы видим, что изучение реологических свойств является неотъемлемой частью при оценке устойчивости подземных сооружений [84] в породах с реологическими свойствами и каменной соли в частности.

1.7 Изученность реологических свойств

К реологическим свойствам в настоящей работе будем относить изменение деформационных и прочностных характеристик каменной соли во времени. Для понимания будет рассмотрен предел длительной прочности в следующей трактовке: предел длительной прочности σ^∞ - максимальное

напряжение, которое не вызывает разрушения породы за сколь угодно длительный промежуток времени при неизменных внешних условиях.

Обзор методов по определению предела длительной прочности осуществлен в работах [8 - 11]. Все известные методы принято разделять на две группы: 1 - прямой метод (классический); 2 - косвенный метод (ускоренный).

1.7.1 Прямой метод

Прямым методом испытываются образцы под постоянным напряжением во времени, с записью времени до разрушения. Данный метод описан в работах [12 – 14,77].

Зависимость между временем и действующим постоянным напряжением характеризует процесс снижения прочности породы во времени и называется функцией долговечности, а график этой функции- кривой длительной прочности. [6] В этом случае пределом длительной прочности считается горизонтальная асимптота, к которой постоянно стремится кривая длительной прочности. Визуально это представлено на рисунке 1.10.

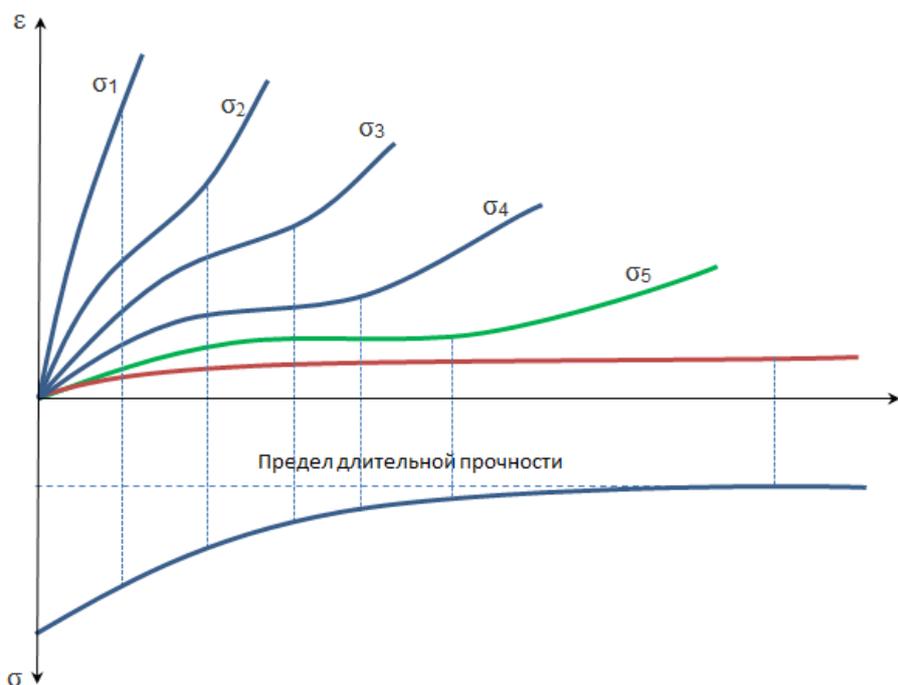


Рисунок 1.10 – График определения предела длительной прочности [6]

В случае, если напряжения меньше или равны пределу длительной прочности, разрушение образца не происходит и деформации ползучести затухают. Экспериментально момент разрушения пластичного материала установить практически не представляется возможным, в таком случае за момент разрушения принимается момент перехода образца в стадию прогрессирующей ползучести. На графике при этом четко прослеживаются три стадии ползучести: стадия неустановившейся ползучести, стадия установившейся ползучести [76] и стадия прогрессирующей ползучести. Для наглядного отображения стадий ползучести был проведен эксперимент в условиях одноосного сжатия при постоянном действующем напряжении.

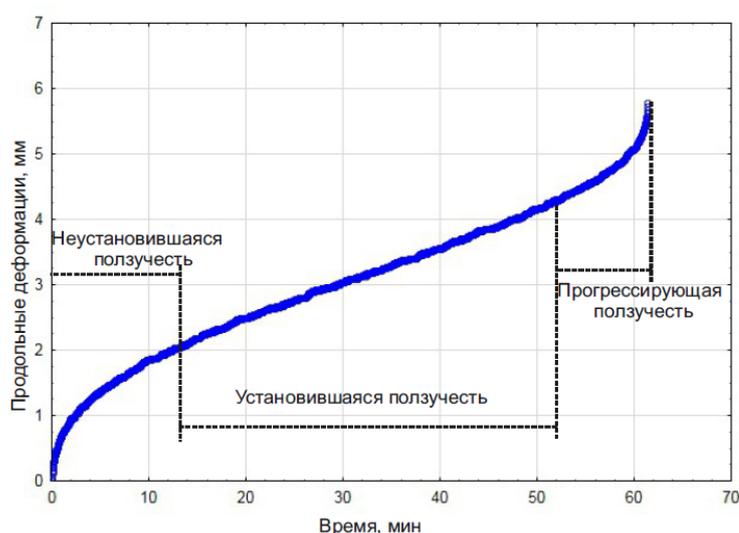


Рисунок 1.11 – Кривая ползучести, полученная в лабораторных условиях.

Одним из основных преимуществ прямого метода определения предела длительной прочности перед косвенными методами является достоверность определяемых величин. Данный метод не требует расшифровки физической сущности процесса деформирования. Главным недостатком данного метода является высокая трудоемкость и самое главное продолжительность проведения эксперимента. Эксперимент прямым методом может проходить от нескольких дней до нескольких месяцев. В течение всего времени проведения эксперимента необходимо поддерживать постоянным напряжения, температуру, влажность и другие внешние условия.

Даже в одноосном напряженном состоянии эксперимент трудоемок, а в сложноподвиженном трудоемкость возрастает многократно.

Немало работ посвящается изучению деформирования пород при длительном нагружении данным методом. В частности примером таких работ является работа [54-56,64]. В исследовании [31] доказывается, что на основные параметры реологических свойств каменной соли в большей мере оказывает влияние изменение суммы главных напряжений.

В последние годы данному методу посвящены работы [35], в которой прогнозируют процесс ползучести при испытаниях на одноосное сжатие. В работе описано вязкое поведение каменной соли. Применение данного метода определения реологических характеристик каменной соли с примесями в режиме трехосного сжатия описано в работе [37]. Поведение каменной соли после испытания прямым методом предложено описывать теоретической моделью в работе [39]. Время проведения единичного эксперимента в указанных выше работах достигает й года.

1.7.2 Косвенные методы

Метод ступенчатого нагружения. Данный метод впервые предложил Г.Н. Кузнецов [15]. Сущность метода заключается в выдерживании нагрузки на каждой ступени до затухания деформаций или достижения ими минимальной постоянной скорости деформирования [81]. Пределом длительной прочности принимают максимальную нагрузку на образец, при которой он не переходит в стадию прогрессирующей ползучести. В работе Карташова Ю.М. [8] было установлено, что значения предела длительной прочности при испытаниях в режиме ступенчатого нагружении являются завышенными. Стоит отметить, что при эксплуатации подземных хранилищ газа в каменной соли, емкость испытывает циклические нагрузки. Данный процесс изучался в работе [32]. При ступенчатом нагружении процесс перехода образца в стадию прогрессирующей ползучести наступает намного раньше, чем при испытаниях прямым методом [44]. Особенностью поведения

горной породы при испытаниях данным методом занимаются и в настоящее время. В частности в работе [47] было установлено, что с увеличением нагружения при различных уровнях бокового давления наблюдается уменьшение вязкости сильвинита. Исследованием ползучести посвящены работы [48-49]. В работе [51] описывается ускорение ползучести от приложенных напряжений. Испытания на ползучесть с напряжениями выдержки меньшими, чем в предыдущем нагружении описаны в работе [53]. Отмечается, что при таком подходе ступенчатого нагружения, образец не утрачивает свойство приобретать пластические деформации. Определение предела длительной прочности при испытании ступенчатым нагружением представлено в работе [60].

Метод ползучести [12, 30]. Основной идеей определения предела длительной прочности в данном методе является предположение, что напряжения, при котором скорость установившейся ползучести равна нулю, представляет собой предел длительной прочности. В работе [33] описывается эмпирически конструктивная модель ползучести широко применяемая в бразильской механике соляных пород. Нелинейная модель ползучести каменной соли с учетом компонент для учета вязкости описана в работе [45].

Метод релаксации напряжений [16]. Релаксация напряжений - снижение напряжений в образце при фиксированном значении деформации. Пределом длительной прочности в случае определения данным методом является предел релаксации. Под пределом релаксации понимается стабилизированное значение напряжений. Изучением в этой области занимался Оксенкруг Е.С. [17]. Экспериментальным путем было установлено, что предел длительной прочности, определяемый в опытах на релаксацию, совпадает с интенсивностью напряжений, при которой в опытах на ползучесть не наблюдается увеличения объема. Во многом предел длительной прочности в данном методе зависит от начальных напряжений, поэтому ответ может быть получен неоднозначный. В частности в работе [52] отмечается, что временная зависимость скорости ползучести в образцах

и временная зависимость скорости релаксации напряжений в образцах меняется в зависимости от соотношения высоты образца к диаметру образца.

Методы, основанные на испытании образцов при различной скорости нагружения или деформирования [18, 19]. Данные методы основаны на предположении, что предел длительной прочности каменной соли соответствует ее прочности при бесконечно медленном нагружении. Зависимость скорости ползучести от девиатора главных напряжений доказано в работе [46]. Основным методом здесь является построение графика после эксперимента «напряжение при разрушении σ от времени нагружения t ». Данный график строится в полулогарифмических координатах « σ - lgt ». В результате получают прямые линии, экстраполируя которые прогнозируют предел длительной прочности за пределом эксперимента. У данного метода существенным недостатком является применение сложного оборудования.

Метод нестационарного нагружения [20]. В данном методе определения предела длительной прочности горных пород напряжения и деформации изменяются во времени одновременно. Такой способ нагружения можно осуществить с помощью упругого динамометра. Данный метод предложил Г.Л. Фисенко. Суть метода заключается в том, чтобы задать нагрузку на образец, через упругий динамометр. При этом образец начинает деформироваться и нагрузка на него начинает падать. За предел длительной прочности принимается величина, при которой деформации образца перестают расти. Основным недостатком в этом методе является то, что предел длительной прочности зависит от величины заданной начальной нагрузки на образец.

Вибрационный метод. Данный метод был предложен Ю.М. Карташовым [21]. Принцип определения предела длительной прочности в данном методе основан на нагружении образца вибрационными нагрузками с определенной частотой и амплитудой. Так как образуются микротрещины, то данный метод во многом ускоряет процесс испытания. Предел длительной

прочности определяемый данным методом очень близок к статическому. Достоинством в данном методе является то, что данные эксперимента не нужно экстраполировать. Основным недостатком это необходимость применения сложного оборудования и отсутствием соответствующих рекомендаций по выбору амплитудно-частотного воздействия.

Билогарифмический метод. [10] Испытания производятся с постоянной скоростью деформирования или нагружения. В процессе испытания идет запись продольных деформаций образца и напряжений, по результатам испытания строится график в координатах «логарифм напряжений – логарифм деформаций». На таком графике прослеживаются два излома. Эти изломы отражают изменение структуры образца в ходе его деформирования. Считается, что второй излом данного графика указывает на предел длительной прочности. К недостатку данного испытания можно отнести его неоднозначность. Не всегда на графике прослеживается два излома.

Метод объемных деформаций [6]. Применяя данный метод, строят график зависимости «напряжение – объемные деформации». Пример приведен на рисунке 1.13. Было установлено в ходе прямого эксперимента, что увеличение объема деформируемого образца связано с образованием сети трещин. Однако некоторые эксперименты показали, что зарождение трещин начинает появляться в некоторых случаях намного раньше экстремальной точки кривой. Перегиб кривой скорее соответствует переходу от стабильного распространения трещин в ходе эксперимента к нестабильному [22]. На рисунке 1.12 построен график по данным полученным в ходе эксперимента на образце Волгоградского меторождения каменной соли.

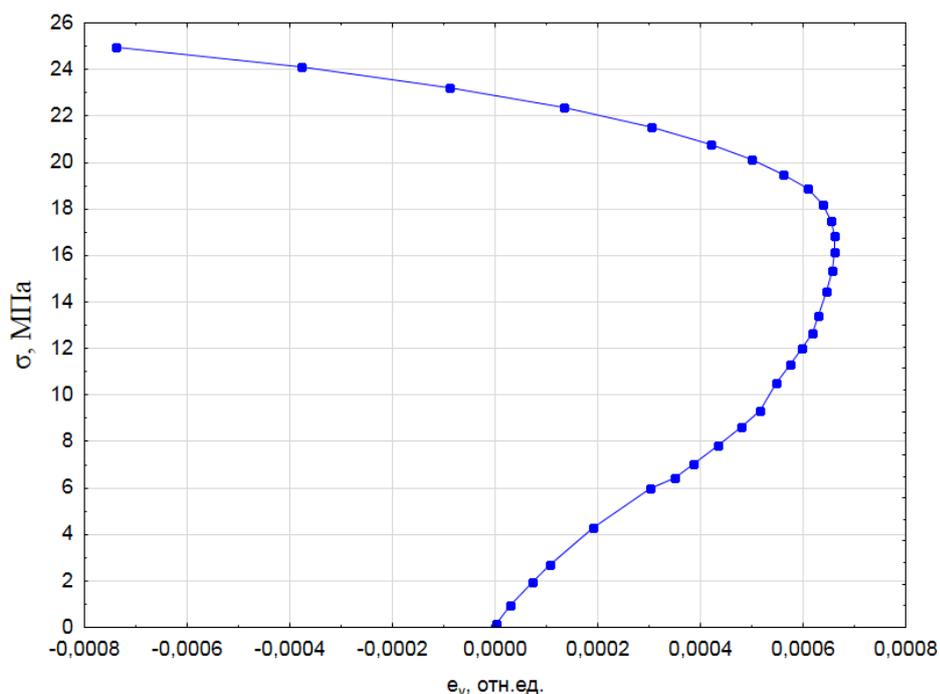


Рисунок 1.12 – График изменения объемных деформаций образца Волгоградского месторождения каменной соли

Одним из основных недостатков данного метода является трудность измерения поперечных деформаций по всей высоте испытываемого образца. Если образец начинает неравномерно деформироваться, то данные эксперимента искажаются [23].

Звуковые методы. [30] Основной идеей данных методов является то, что изменение структуры образца в ходе эксперимента можно зарегистрировать изменением скорости прохождения ультразвука через испытываемый образец. Предполагается, что предел длительной прочности можно определить изменением скорости прохождения волн или изменением импульсов звуковых сигналов, которые образец создает в ходе нагружения. Однако большинство авторов данных работ [24, 25] склонны утверждать, что изменение скорости связано с фактом изменения структуры образца, но не связывают это с пределом длительной прочности. В настоящее время активно изучается акустическая эмиссия при испытаниях образцов, так в работе [36] описывается акустическая эмиссия при длительных испытаниях в режиме трёхосного сжатия. Анализ коррекции между стадиями ползучести и

акустической эмиссией в условиях одноосного сжатия описана в работе [43]. Ультразвуковому изучению ползучести посвящена работа [58].

Метод изменения скорости нагружения [30]. Образец нагружают с постоянной скоростью. В ходе эксперимента напряжения начинают резко увеличиваться. Строится график зависимости «напряжения σ – время t ». В определенный момент времени образование микротрещин происходит нестабильно и скорость нагружения начинает падать. Момент снижения напряжений на образец и принимается за предел длительной прочности. Результаты, полученные при испытаниях данным методом, хорошо коррелируют с результатами, полученными прямым методом определения предела длительной прочности [26].

Метод изменения скорости деформирования [30]. При испытании данным методом образец нагружают с постоянной скоростью, и в равные промежутки времени записывается напряжение и соответствующие им продольные деформации. После строится график зависимости «напряжения σ – скорость продольных деформаций ϵ ». В результате получается линейная зависимость до определенного момента. Представлено на рисунке 1.13.

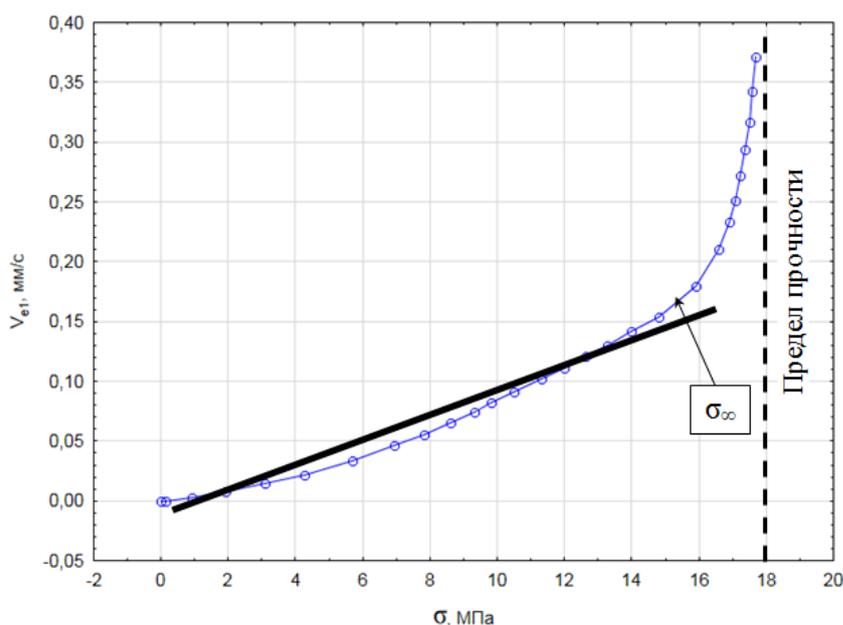


Рисунок 1.13 – График зависимости скорости деформирования от напряжений образца Волгоградского месторождения каменной соли [30]

Отклонение от линейной зависимости сигнализирует о начале интенсивного образования трещин, данное значение напряжений и принимается за предел длительной прочности. Преимуществом данного метода является то, что нет необходимости измерять поперечные деформации образца. Основной недостаток – трудность поддержания постоянной скорости нагружения.

Метод Ю.М. Карташова [8, 11, 21, 23]. Карташов Ю.М. установил, что напряжения, соответствующие пределу длительной прочности, являются переломным моментом, разделяющие физические явления, проходящие в образце в ходе эксперимента. Когда нагрузка меньше предела длительной прочности, образец уплотняется и упрочняется. Разрыхление и разупрочнение образца происходит, когда напряжения превышают предел длительной прочности. После испытания образцов на ползучесть их испытывают на одноосное сжатие. Строится график зависимости прочности на одноосное сжатие от степени нагружения образца в ходе эксперимента на ползучесть. За предел длительной прочности принимается величина напряжения, соответствующая резкому снижению прочности на одноосное сжатие.

Метод микроразрушений [28]. В основу метода положено предположение, что напряжения соответствующие пределу длительной прочности образца вызывают образование микротрещин на поверхности образца [28]. Данные определяемые по этому методу носят как правило завышенный характер [29]. Основным недостатком данного метода перед остальными косвенными методами – значительно большая продолжительность испытания. Методы определения предела длительной прочности представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Методы определения предела длительной прочности [30].

Наименование метода	Продолжительность	Достоинства	Недостатки
Прямой метод	Месяцы	Не требует расшифровки физической сущности процесса деформирования и разрушения	Сложное оборудование, длительное время
Метод ступенчатого нагружения	Месяцы	Минимальное количество образцов	Завышенные значения
Метод ползучести	Месяцы	Получение аналитического описания процесса ползучести	Трудоемкость проведения, трудоемкость обработки с применением сложного математического аппарата
Метод релаксации напряжений	Несколько суток	Получение связи релаксационных характеристик и характеристик ползучести	Не дает во всех случаях однозначный и объективный результат
Методы, основанные на испытании образцов при различной скорости нагружения или деформирования.	От нескольких суток до нескольких месяцев	Возможность определения предела длительной прочности за пределами опыта	Экстраполяция экспериментальных данных
Метод нестационарного нагружения	Десятки суток	Объединяет несколько методов графического определения предела длительной прочности	Полученные значения зависят от начального напряжения
Вибрационный метод	Несколько часов	Определение предела длительной прочности не связано с экстраполяцией	Необходимость применения специального оборудования

Продолжение таблицы 1.2

Наименование метода	Продолжительность	Достоинства	Недостатки
Билогарифмический метод	Несколько минут	Исключение трудоемкости измерения поперечных деформаций	Неоднозначность получаемых данных
Метод объемных деформаций	От нескольких минут до нескольких десятков суток	Простота в обработке, время сокращено до нескольких минут, получение данных не связано с экстраполяцией	Трудоемкость измерения поперечных деформаций по всей высоте образца
Звуковые методы	От нескольких минут до нескольких часов	Значительное сокращение времени проведения эксперимента	Применение сложного оборудования
Метод Ю.М. Карташова	Несколько суток	Не связан с экстраполяцией результатов эксперимента	Необходимо проводить дополнительные испытания после экспериментов на ползучесть для определения предела длительной прочности
Метод микроразрушений	Несколько часов	Разрозненность результатов	Завышенные данные предела длительной прочности, трудоемкость

Выводы и постановка задачи исследований

Приведённый выше обзор и анализ литературных источников позволяет сделать следующие выводы.

1) Устойчивость подземных хранилищ газа в каменной соли обеспечивается за счет соответствующих проектных решений, обоснование которых предполагает наличие достоверной информации о физико-механических свойствах соляных пород вмещающего подземные резервуары массива.

2) Каменная соль обладает ярко выраженными реологическими свойствами. В связи с этим их определение следует рассматривать как одну из приоритетных задач для принятия правильных проектных решений и обеспечения максимальной эффективности работы подземных резервуаров.

3) Существует значительное количество методов определения реологических свойств горных пород, однако большинство из них отличаются высокой трудоемкостью, неоднозначностью или недостоверностью и длительностью.

4) Наиболее перспективным из существующих методов определения реологических свойств каменной соли с точки зрения минимизации трудозатрат и сокращения времени эксперимента и получения максимально достоверных сведений является метод ступенчатого нагружения. Однако в данном методе отсутствует научное обоснование времени необходимого ступени, при соответствующей нагрузке, количество ступеней, и величины нагрузок на ступени.

В связи с вышесказанным необходимым является обоснование методических подходов к реализации экспериментального определения реологических свойств с использованием ступенчатого нагружения. Для достижения отмеченной цели необходимо решить следующие задачи:

1) Определить закономерность поведения каменной соли в ходе испытаний по определению реологических характеристик прямым методом и

ступенчатым методом в режиме одноосного и трехосного нагружения с изменяющимися значениями величины нагружения и продолжительности ступени.

2) Определить сходимость реологических характеристик каменной соли на основе полученных по результатам испытаний прямым и ступенчатым методом.

3) На основе полученных результатов определения реологических характеристик прямым и ступенчатым нагружением обосновать оптимальные методические подходы оценки реологических свойств соляных горных пород в режимах одноосного и трехосного нагружения.

Глава 2. Одноосные испытания

2.1 Подготовительная работа с керновым материалом

В связи с необходимостью детального изучения реологических свойств каменной соли, учитывались экспериментальные данные не только в объемном сжатии, но и в одноосном. В данной главе приведены эксперименты исследования каменной соли в режиме одноосного сжатия. Подробное описание исследований приведено в работе [79].

Отбор образцов производился из керна с похожей структурой. Для этого производилось фотографирование керна на просвет. Фото керна на просвет представлено на рисунке 2.1.

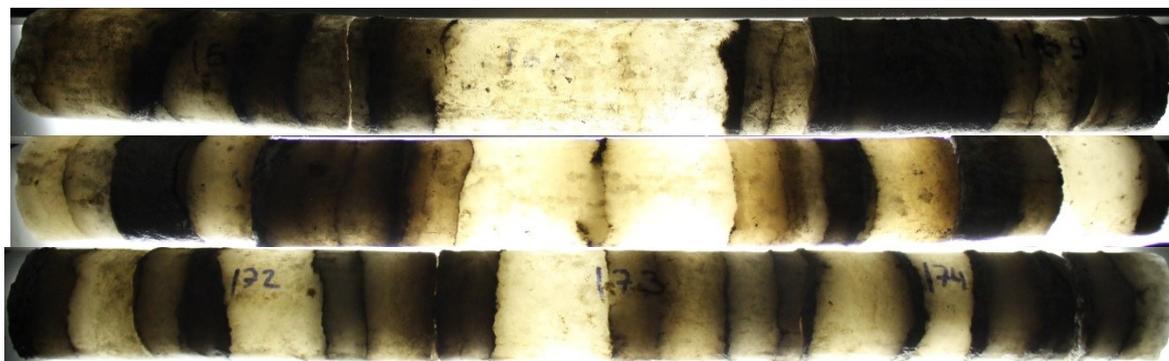


Рисунок 2.1 – Фото кернового материала

Для проведения экспериментов изготавливались образцы цилиндрической формы методом вытачивания на токарном станке с отношением высоты образца к диаметру h/d как 2/1. Размеры образцов варьировались в зависимости от установки, на которой они испытывались. Минимальные размеры составляли $h = 70.0$ мм $d = 35.0$ мм, максимальные - $h = 165,0$ мм, $d = 82,5$ мм.

Все изготовленные образцы разбивались на группы в зависимости от структурных особенностей [70,73]. Это необходимо при выборе образцов на каждый вид испытаний, чтобы минимизировать отличие образцов по структуре друг от друга.

Исследования проводились на образцах каменной соли Волгоградского месторождения. Глубина залегания отобранного кернового

материала от 1300 до 1460 метров. Галогенная толща на данном участке представлена восемью ритмопачками соленакпления, имеющие мощность от первых метров до десятком метров. Ритмопачки на данном участке разобщены ангидрит-доломитовой породой. Отобранный керновый материал представлен каменной солью VI и V ритмопачек сложенных преимущественно галитом. Каменной соль представлена разномзернистой: от средне-крупнозернистой до весьма крупнозернистой - гигантокристаллической за счет собирательной перекристаллизации. Для проведения испытаний выбирались образцы каменной соли максимально схожие по структурно-текстурному строению. Плотность каменной соли в исследуемых образцах изменялась от 2,14 до 2,22 кг/см³, в зависимости от их строения и наличия примесей. Содержание галита в исследуемых образцах составляло не менее 95 %.

2.2 Описание оборудования для проведения испытаний

Все эксперименты, выполненные для задач настоящей диссертационной работы, были проведены на оборудовании отвечающим всем необходимым современным нормам по условиям проведения экспериментов и точности измерения данных и соответствуют современному научно-техническому уровню. Эксперименты проводились в аккредитованном лабораторном центре с применением действующих поверенных средств измерений. Это позволило получить корректные данные для последующего анализа. Данная глава посвящена проведению испытаний в одноосном сжатии. Для проведения экспериментов применялся испытательный комплекс НПП Геотек «АСИС» с двумя нагружающими рамами максимальной нагрузки 5 тонн и 3 тонны. Данный комплекс предназначен для внешних условий эксплуатации при температуре окружающего воздуха от плюс 15 до плюс 35 °С, относительной влажности воздуха до 80% и атмосферном давлении от 630 до 800 мм рт. ст. Испытательный комплекс состоит из:

- устройства осевого нагружения (рамы);
- системы измерительной СИ «АСИС»;
- программного обеспечения.

Общий вид комплекса предоставлен на рисунке 2.4



Рисунок 2.2 - Общий вид испытательного комплекса НПП Геотек «АСИС»

Испытательная установка комплектуется из устройства осевого нагружения, осуществляющего механическое воздействие на образец вертикальной нагрузкой, датчиков и электронно-преобразующего блока из состава «АСИС».

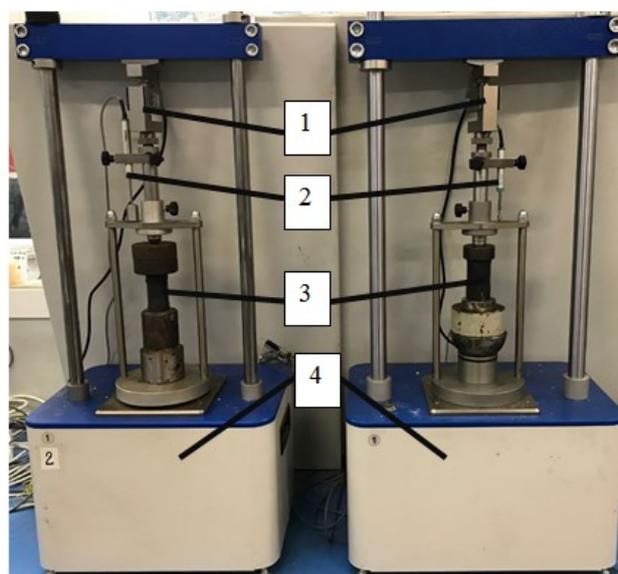


Рисунок 2.3 – Испытательные установки. 1 - датчики силы, 2 – датчики линейных перемещений, 3 – испытываемые образцы, 4 – нагружающие рамы

Измерительная система «АСИС» относится к средствам измерений, она осуществляет:

- прямые измерения вертикальной нагрузок на испытываемые образцы, их деформации;
- управление процессом испытаний (нагрузением и разгрузкой);
- обработку результатов измерений;
- архивирование и визуализацию результатов измерений и вычислений.

В состав комплекса входят датчики линейных перемещений с потенциометром GEFRAN. Все применяемые в экспериментах датчики проходили поверку и имели действующие свидетельства о поверке. Точность измерения у датчиков с максимально возможным перемещением 25 мм составляет 0,001.



Рисунок 2.4 – Датчик линейных перемещений с потенциометром

На нагружающих рамах установлены датчики силы АЦДС-50/1И-0,5 с диапазоном измерения от 5 кН до 50 кН. с точностью $\pm 0,12$ %. Датчики проходили поверку и во время проведения экспериментов имели действующие свидетельства о поверке средств измерений.



Рисунок 2.5 – Датчик силы АЦДС-50/1И-0,5

2.3 Ступенчатое нагружение

В ходе испытаний каменной соли прямым и ступенчатым методом важным аспектом является выявление закономерностей поведения каменной соли с изменением значений величины ступени нагружения. Величина ступени нагружения выбиралась исходя из экспериментов по определению предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ в условиях быстрого нагружения. Для определения предела прочности на сжатие при быстром нагружении были отобраны образцы одной группы со схожей структурой и текстурой. Эксперименты производились по схеме быстрого нагружения со скоростью нагружения $\nu=1$ МПа/с, в результате чего определялось максимальное напряжение разрушения - предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$. Напряжение и напряжение на образец рассчитывалась автоматически программным комплексом по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{N}{S}, \text{ МПа} \quad (2.1)$$

$$N = D \cdot g, \text{ Н} \quad (2.2)$$

где S - площадь поперечного сечения образца, м^2 ;

D - нагрузка, кг;

g - ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Продольные деформации образца рассчитывались автоматически в относительных единицах по формуле:

$$\varepsilon_1 = \frac{e_1}{h}, \text{ дол. ед.}, \quad (2.3)$$

где e_1 - продольные деформации образца в абсолютных единицах, м.

Результаты представлены на рисунке 2.6.

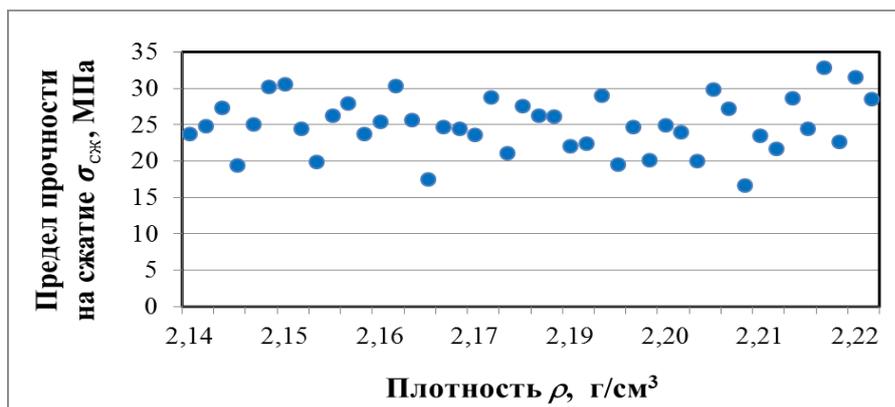


Рисунок 2.6 – Значения осевого напряжений, при которых происходило разрушение образцов в условиях быстрого нагружения

Представленный на рисунке 2.6 график показывает, что предел прочности на одноосное сжатие для испытанных образцов не зависит от плотности испытываемых образцов в исследуемом диапазоне. Распределения указанного прочностного параметра приведено на рисунке 2.7.

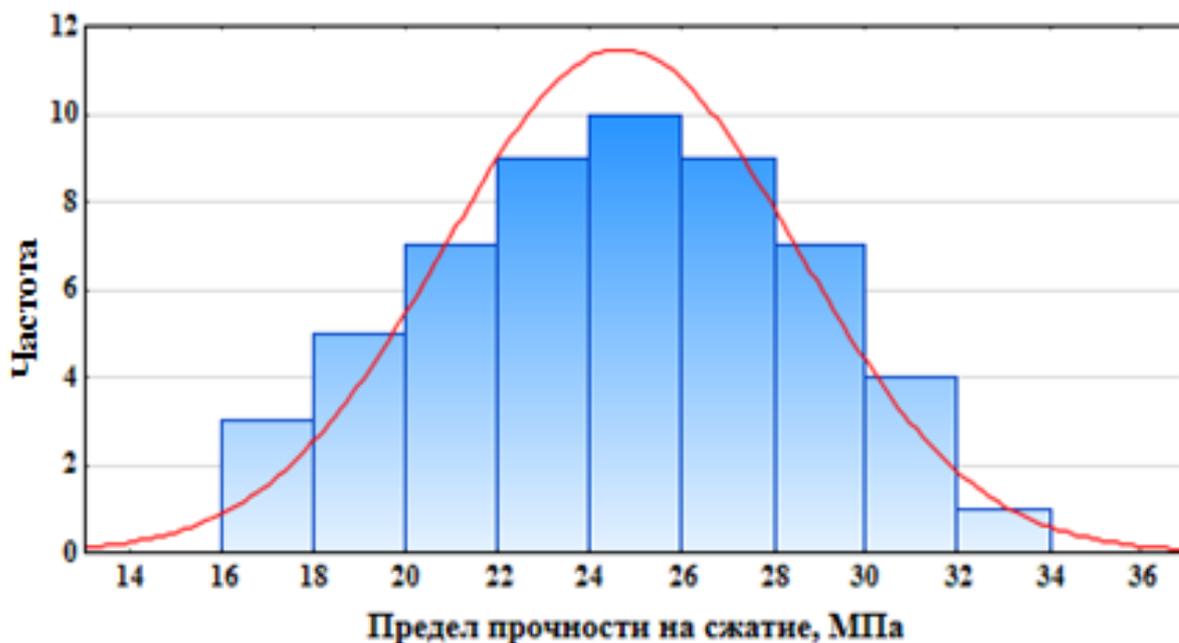


Рисунок 2.7 – График нормального распределения предела прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$

В ходе статистической обработки данных определено среднее значение предела прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 25$ МПа. Стандартное отклонение составило $S = 3,8$ МПа. Коэффициент вариации менее $V = 15\%$. Это являлось достаточным условиям достоверности принятия величины предела

прочности каменной соли на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$. Определение $\sigma_{сж}$ производилось для дальнейших расчётов по обоснованию величины ступени нагружения.

В связи с необходимостью обоснования времени выдержки постоянной нагрузки на каждой ступени были проведены эксперименты с постоянной величиной ступени $\sigma_n = 3$ МПа. На рисунке 2.8 представлен график изменения осевых деформаций и напряжений в режиме ступенчатого нагружения во времени.

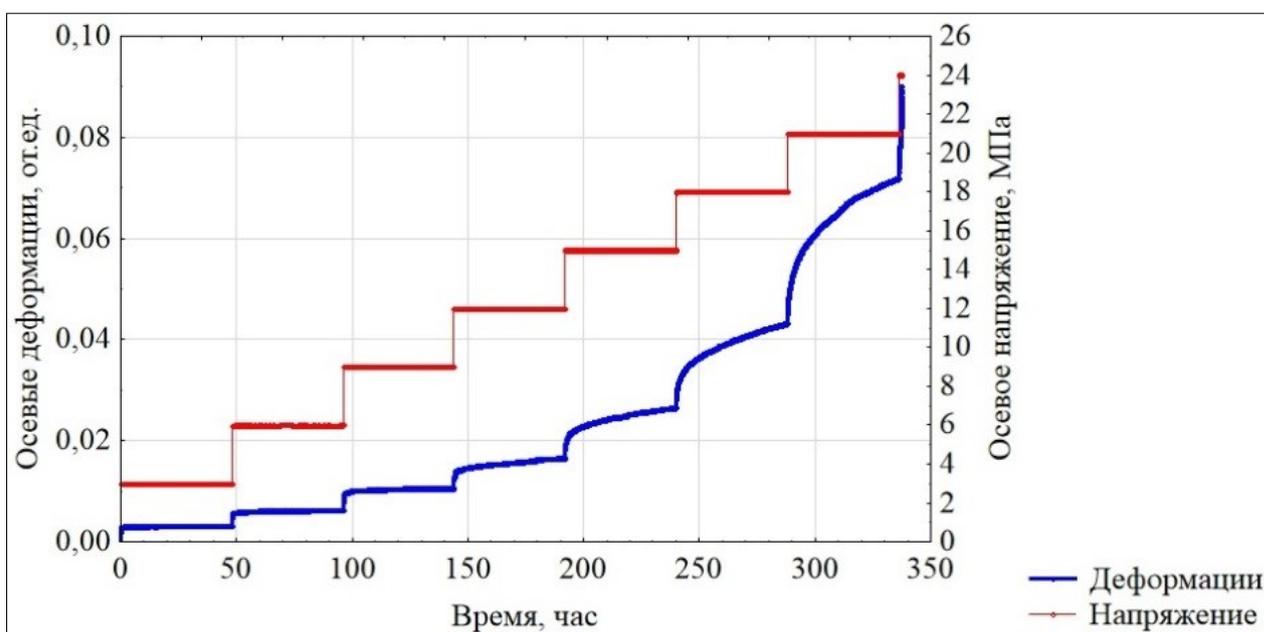


Рисунок 2.8 – График изменения осевых деформаций ε_1 и напряжений σ_1 на каждой ступени во времени

Отмечается тот факт, что проведение экспериментов в режиме ступенчатого одноосного нагружения производилось следующим образом. К образцу прикладывалась и сохранялась постоянной на протяжении времени t одна и та же нагрузка $\sigma_1 = 3$ МПа, затем нагрузка увеличивалась на 3 МПа и снова сохранялась постоянно на протяжении времени t . Таким образом, процедура повторялась до разрушения образца каменной соли. Величина ступени σ_n составляла в экспериментах 3 МПа. Согласно выбранному режиму испытаний, на следующем образце величины нагрузок соответствовали проведенному эксперименту, однако величина времени

ступени t изменялась и была выбрана автором с учетом максимально возможного количества проведения экспериментов и времени затраченного на эксперименты.

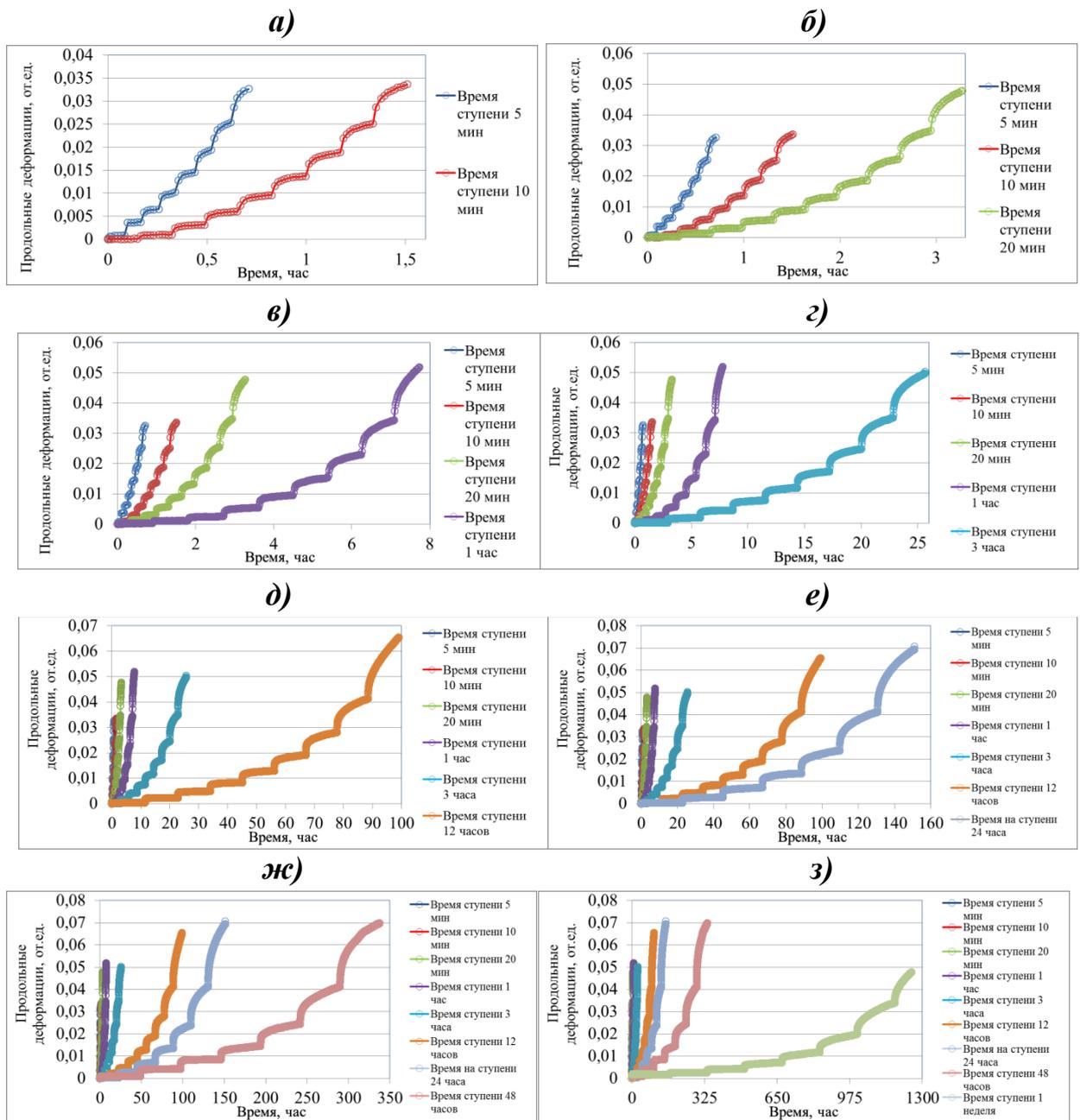
Таким образом, в таблице 2.1 приведены значения времени t и степень увеличения напряжения σ_n проведенных экспериментов.

Таблица 2.1 – Условия проведения ступенчатого нагружения

Величина напряжения на каждой ступени σ_n , МПа	Время каждой ступени t_{cm} , при которой нагрузка $\sigma_n = const$
3	5 мин
	10 мин
	20 мин
	1 час
	3 часа
	12 часов
	24 часа
	48 часов
	168 часов (1 неделя)
	336 часов (2 недели)

На рисунке 2.9 представлены графики продольного деформирования каменной соли с одинаковой величиной нагрузки на ступени $\sigma_n = 3$ МПа, но разной величиной времени t на ступени. Время ступени отображено в таблице 2.1. Графикам присвоена нумерация (а) – (и). На каждом последующем графике начиная от графика (а) к (и) добавляется кривая продольного деформирования с увеличенной величиной времени на ступени по таблице 2.1. Для получения каждой кривой изменения продольных деформаций ε_1 во времени t проводились испытания 5 идентичных по структурным и текстурным особенностям образцов каменной соли. Данные продольных деформаций ε_1 усреднялись по идентичным испытаниям и строился итоговый график изменения продольных деформаций во времени. Эксперименты проводились с целью оценки величин скорости v_1 продольного деформирования каменной соли. В общем случае все представленные результаты эксперимента представляют собой набор

значений осевых напряжений σ_1 , МПа; продольных деформаций ϵ_1 , дол. ед.; времени t , с. Таким образом, по полученным значениям были отстроены графики изменения продольных деформаций ϵ_1 от времени t , для всех проведенных испытаний. На рисунке 2.9 представлены достоверные сведения о результатах экспериментов. Часть экспериментов была отбракована по причинам расхождения данных при одних и тех же параметрах испытания.



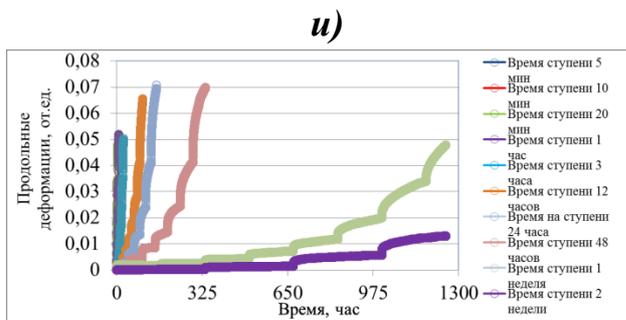


Рисунок 2.9 – Графики изменения продольных деформаций ε_1 во времени t образцов каменной соли при идентичных величинах создаваемых напряжений σ_1 . а) $t=5$ мин, 10мин; б) $t=5$ мин, 10 мин, 20 мин; в) $t=5$ мин, 10 мин, 20 мин, 1 час; г) $t=5$ мин, 10 мин, 20 мин, 1 час, 3 часа; д) $t=5$ мин, 10 мин, 20 мин, 1 час, 3 часа, 12 часов; е) $t=5$ мин, 10 мин, 20 мин, 1 час, 3 часа, 12 часов, 24 часа; ж) $t=5$ мин, 10 мин, 20 мин, 1 час, 3 часа, 12 часов, 24 часа, 48 часов; з) $t=5$ мин, 10 мин, 20 мин, 1 час, 3 часа, 12 часов, 24 часа, 48 часов, 1 неделя; и) $t=5$ мин, 10 мин, 20 мин, 1 час, 3 часа, 12 часов, 24 часа, 48 часов, 1 неделя; 2 недели

В ходе экспериментов шла запись данных каждую секунду, при обработке экспериментов, у которых время на каждой ступени длилось 3 часа и более производилось усреднение результатов, данные брались по точкам каждые 10 мин. Далее производилось описание кривой изменения продольных деформаций ε_1 от времени t методом наименьших квадратов. Коэффициентом корреляции при этом удовлетворял условию $r \geq 0,95$.

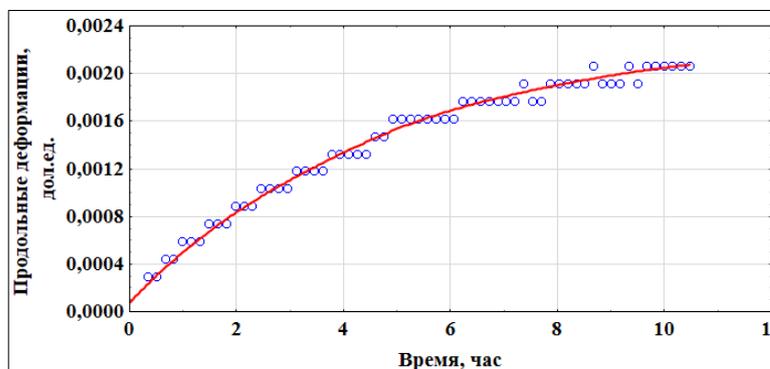


Рисунок 2.10 – Пример описание экспериментальных данных методом наименьших квадратов

Как уже было отмечено ранее, в моделях ползучести принято рассматривать три вида или три стадии ползучести или стадии деформирования образца. Практический интерес представляет вторая стадия ползучести (установившаяся, квазистационарная). Установившаяся стадия характеризуется постоянной скоростью деформаций. При проведении эксперимента с постоянной температурой, скорость деформирования v_1 зависит от дифференциального напряжения (девиатора). В проводимых экспериментах девиатор напряжений соответствует создаваемому осевому напряжению σ_1 .

2.3.1 Обоснование величины времени на каждой ступени при проведении экспериментов в режиме ступенчатого нагружения

Данные, полученные в ходе экспериментов обрабатывались и производилось количественное и качественное сравнение полученных скоростей деформирования. Скорость деформирования рассчитывалась по формуле:

$$v_n = \frac{e_i}{t}, \text{ дол. ед./с}, \quad (2.4)$$

$$e_i = e_n - e_{n-1}, \text{ дол. ед.} \quad (2.5)$$

где $e_n - e_{n-1}$ – значения деформации, накопленные за время t , дол. ед.;

t - время, соответствующее интервалу записи данных в ходе эксперимента.

На рисунке 2.11 представлен график скоростей деформирования v_n для эксперимента с временем t постоянной нагрузки σ_1 на ступени равным 48 часам.

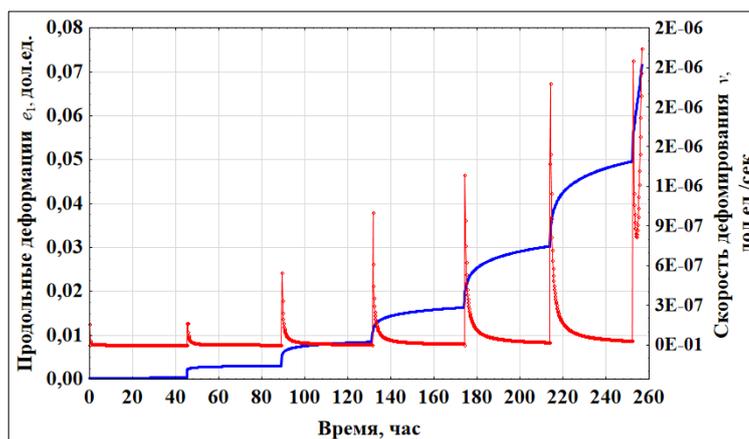


Рисунок 2.11 – График зависимости деформаций ϵ_1 и скорости деформирования ν от времени.

На рисунке 2.12 графики скорости деформирования на каждой ступени наложены с учетом обнуления времени на ступени.

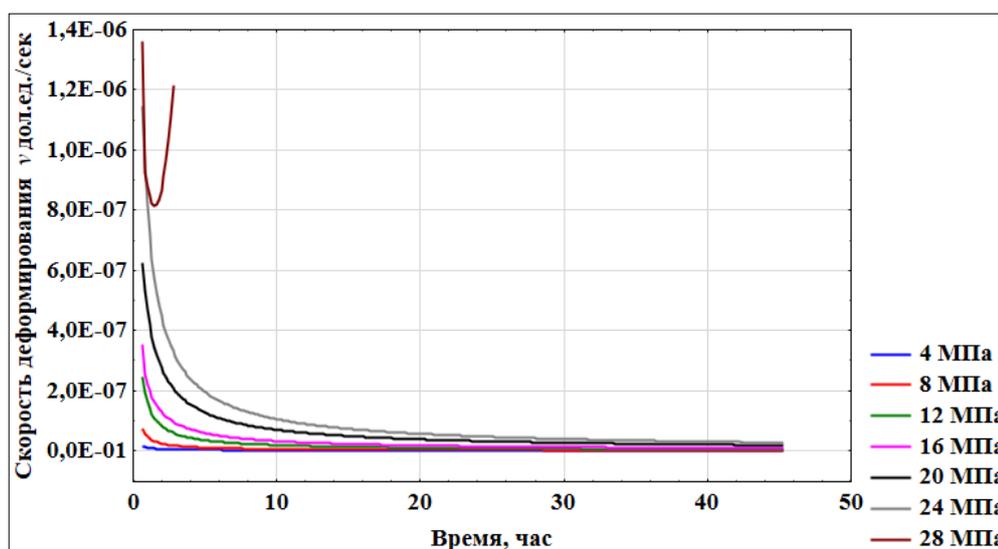


Рисунок 2.12 – График скорости деформирования ν образца образцов Волгоградского месторождения каменной соли

Особо стоит отметить, что на каждой ступени скорости деформирования затухают в том случае, если не происходит разрушение образца. На рисунке выше при напряжении 28 МПа видно, что деформирование образца перешло в прогрессирующую стадию ползучести, что привело к росту скорости деформирования на конечной стадии. Отдельного внимания требует тот факт, что прогнозирование процесса ползучести на участке, где образец перешел в стадию прогрессирующей

ползучести и скорость ν начала возрастать, является сложным процессом и мало практичным, т.к. переход горной породы в стадию прогрессирующей ползучести приводит к разрушению, что недопустимо в рамках проведения прочностных расчетов. В связи с этим, дальнейшее обоснование времени постоянного напряжения на каждой ступени будет производиться для ступеней, где образец не переходит в стадию прогрессирующей ползучести.

В результате качественной оценки изменения скорости деформирования, исследования были направлены на определение стадий установившейся ползучести на каждой ступени. На каждой ступени деформирования выделялся прямолинейный участок для определения скорости деформирования. При этом прямолинейный участок принимался как стадия установившейся ползучести. Выделение прямолинейных участков на графике деформирования продемонстрировано на рисунке 2.13.

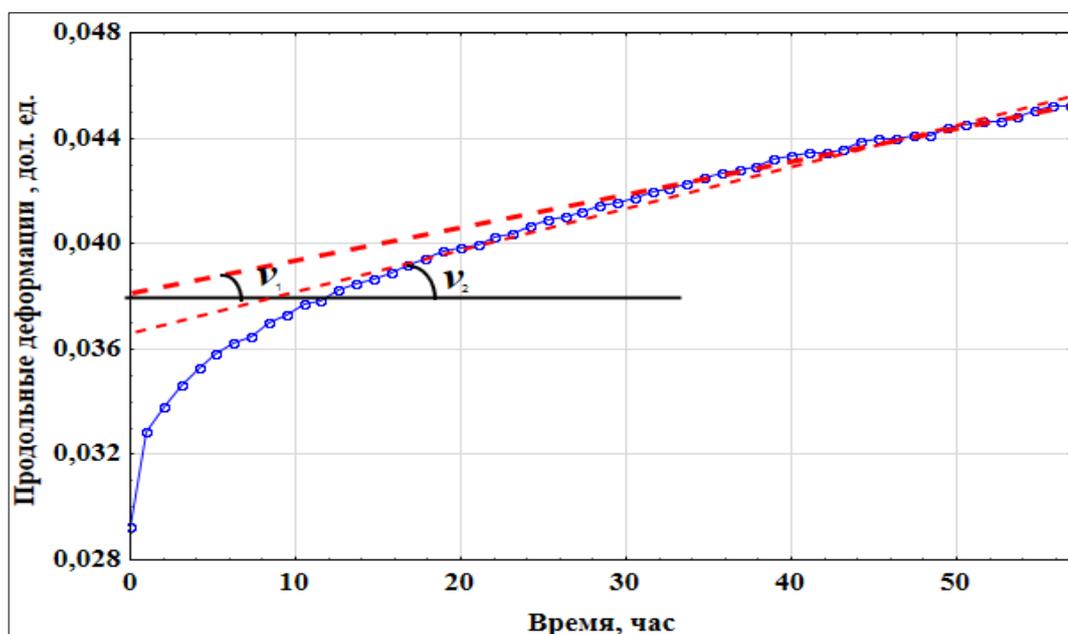


Рисунок 2.13 – График выделения прямолинейных участков для определения скорости деформирования

С целью определения скорости продольного деформирования на кривой выделяется графически прямолинейный участок. Стоит отметить, что при графическом выделении, скорость деформирования будет в значительной мере отличается от того, как выделен прямолинейный участок.

В связи с этим необходимо исследовать численные значения скоростей деформирования каменной соли с целью выявления минимального времени, при котором можно выделять прямолинейный участок деформирования.

Для всех экспериментов, отмеченных в таблице 2.1 производилось определение скоростей продольного деформирования как показано на рисунке 2.14. В таблицу 2.2 вносились минимальные значения скоростей на каждой степени. Значения отмечены на рисунке 2.14.

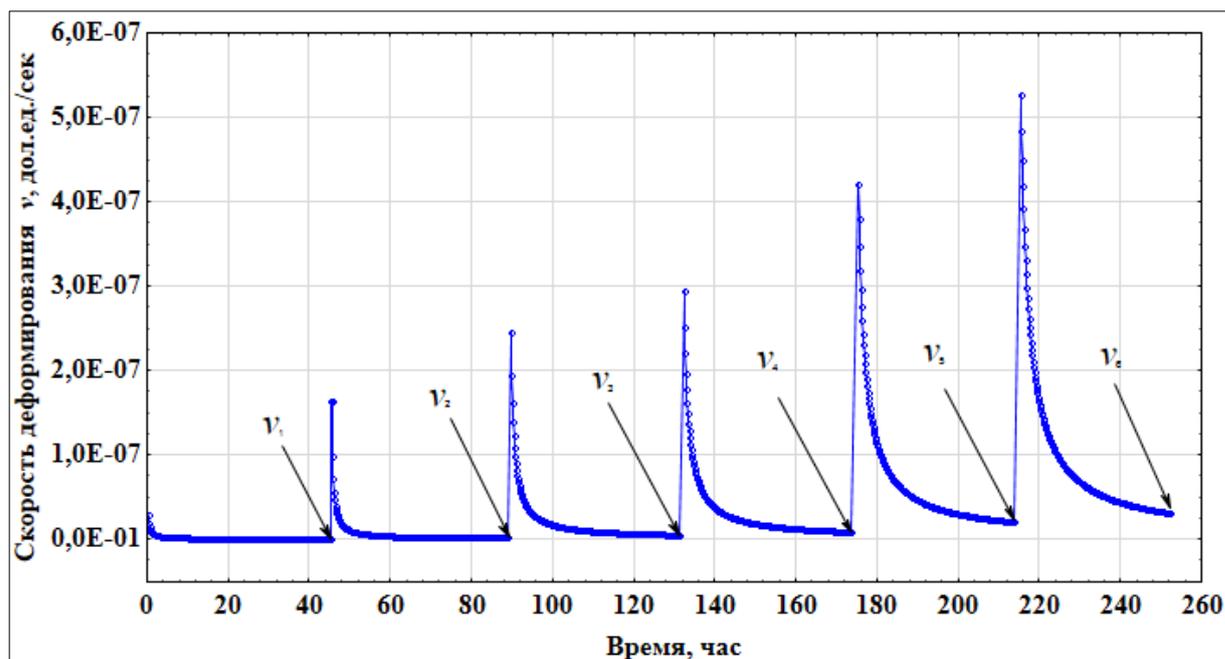


Рисунок 2.14 – Характерные точки минимальных скоростей на графике зависимости скорости продольного деформирования v_1 от времени t

Для выявления времени, при котором скорость деформирования выходит на постоянную величину были проведены эксперименты с временем на ступенях равным 68 часам. На одной ступени время было сокращено до 19 часов. График изменения скорости продольного деформирования эксперимента v_1 представлен на рисунке 2.15.

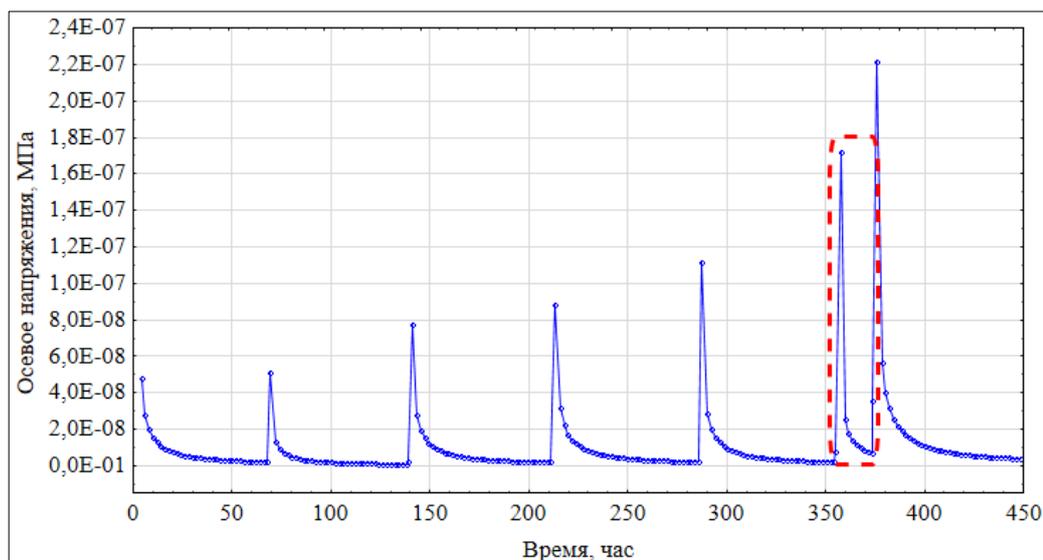


Рисунок 2.15 – График изменения скорости деформирования образца от времени

На графике красной областью выделена ступень продолжительностью 19 часов. По графику можно заметить, что скорость на этой ступени не успела выйти на постоянную величину. График изменения скорости деформирования от напряжения на ступени представлен на рисунке 2.16.

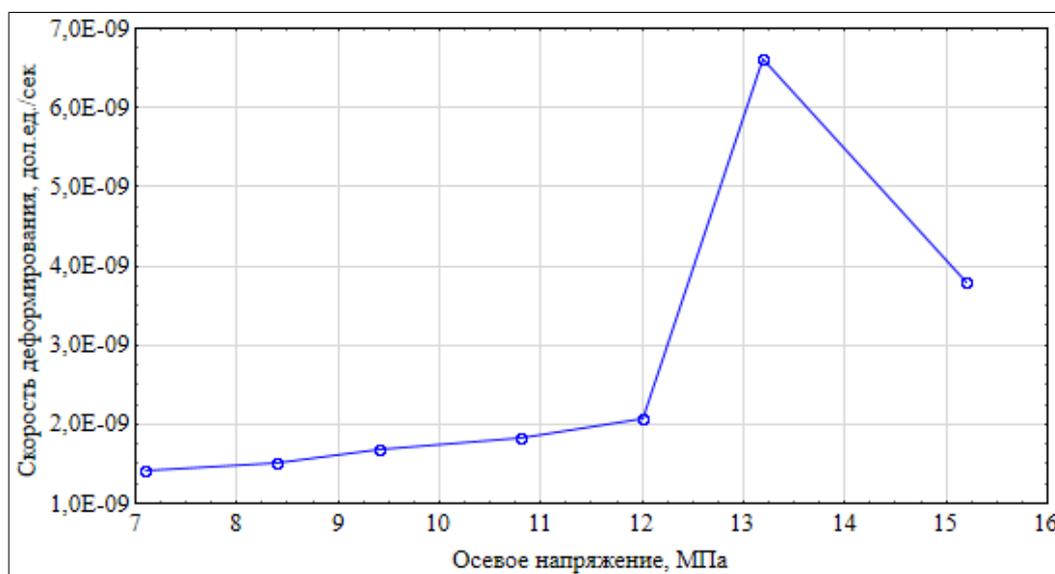


Рисунок 2.16 – График изменения скорости деформирования от напряжения на ступени

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о том, что определение скорости деформирования каменной соли сильно зависит от времени проведения эксперимента. Для достоверного определения скорости

деформирования необходима практическая реализация экспериментов с различным временем на ступени и последующий анализ и сравнение со скоростью полученной в экспериментах проведенных прямым методом. Результаты определения скоростей деформирования при различном времени выдержки постоянного напряжения на ступени представлено в таблице 2.2. Так же в таблице 2.3 представлены результаты определения скорости деформирования при проведении реологических испытаний прямым методом. Время эксперимента прямым методом составляло 300 часов. Напряжение подбиралось таким образом, чтобы оно соответствовало напряжению создаваемому на ступенях при испытаниях в режиме ступенчатого нагружения.

Таблица 2.2 – Скорости на ступенях с разным временем выдержки постоянного напряжения

Напряжение, МПа	Скорость, дол.ед./с										
	5 мин	10 мин	20 мин	30 мин	1 час	3 часа	12 часов	24 часа	48 часов	1 неделя	2 недели
3	$7,91 \cdot 10^{-7}$	$2,22 \cdot 10^{-7}$	$8,41 \cdot 10^{-8}$	$4,96 \cdot 10^{-8}$	$3,33 \cdot 10^{-8}$	$1,13 \cdot 10^{-8}$	$2,28 \cdot 10^{-9}$	$1,77 \cdot 10^{-9}$	$1,03 \cdot 10^{-9}$	$2,11 \cdot 10^{-10}$	$1,13 \cdot 10^{-10}$
6	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$3,26 \cdot 10^{-7}$	$1,41 \cdot 10^{-7}$	$8,02 \cdot 10^{-8}$	$5,60 \cdot 10^{-8}$	$1,84 \cdot 10^{-8}$	$4,15 \cdot 10^{-9}$	$3,86 \cdot 10^{-9}$	$2,44 \cdot 10^{-9}$	$2,77 \cdot 10^{-10}$	$1,87 \cdot 10^{-10}$
9	$1,48 \cdot 10^{-6}$	$4,80 \cdot 10^{-7}$	$2,38 \cdot 10^{-7}$	$1,29 \cdot 10^{-7}$	$9,42 \cdot 10^{-8}$	$2,99 \cdot 10^{-8}$	$7,54 \cdot 10^{-9}$	$8,42 \cdot 10^{-9}$	$5,76 \cdot 10^{-9}$	$8,41 \cdot 10^{-10}$	$1,01 \cdot 10^{-9}$
12	$2,03 \cdot 10^{-6}$	$7,07 \cdot 10^{-7}$	$4,01 \cdot 10^{-7}$	$2,10 \cdot 10^{-7}$	$1,58 \cdot 10^{-7}$	$4,85 \cdot 10^{-8}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$	$1,83 \cdot 10^{-8}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$	$2,42 \cdot 10^{-9}$	
15	$2,78 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	6,75E-07	$3,39 \cdot 10^{-7}$	$2,66 \cdot 10^{-7}$	$7,87 \cdot 10^{-8}$	$2,48 \cdot 10^{-8}$	$4,00 \cdot 10^{-8}$	$3,22 \cdot 10^{-8}$	$4,92 \cdot 10^{-9}$	
18	$3,81 \cdot 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$5,49 \cdot 10^{-7}$	$4,47 \cdot 10^{-7}$	$1,27 \cdot 10^{-7}$	$4,51 \cdot 10^{-8}$	$8,72 \cdot 10^{-8}$	$7,61 \cdot 10^{-8}$	$1,16 \cdot 10^{-8}$	
21	$5,21 \cdot 10^{-6}$	$2,25 \cdot 10^{-6}$	$1,91 \cdot 10^{-6}$	$8,89 \cdot 10^{-7}$	$7,53 \cdot 10^{-7}$	$2,07 \cdot 10^{-7}$	$8,19 \cdot 10^{-8}$	$1,90 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$		
24	$7,14 \cdot 10^{-6}$	$3,31 \cdot 10^{-6}$	$2,69 \cdot 10^{-6}$	$1,43 \cdot 10^{-6}$	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$6,35 \cdot 10^{-7}$	$1,48 \cdot 10^{-7}$	$5,16 \cdot 10^{-7}$			

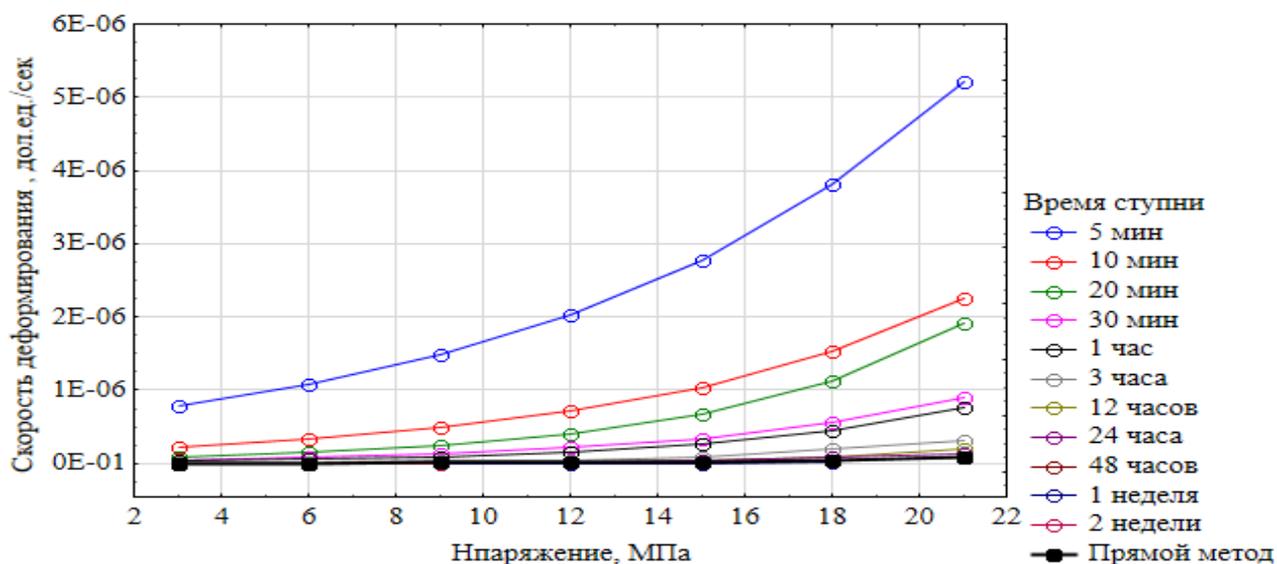
Таблица 2.3 - Скорости ползучести образцов испытанных прямым методом

Напряжение, МПа	Время проведения эксперимента, час	Скорость, дол.ед./с
3	300	$9,81 \cdot 10^{-10}$
6		$2,21 \cdot 10^{-9}$
9		$5,63 \cdot 10^{-9}$
12		$1,11 \cdot 10^{-8}$
15		$1,66 \cdot 10^{-8}$
18		$4,38 \cdot 10^{-8}$
21		$7,63 \cdot 10^{-8}$

Результаты определения продольных скоростей деформирования v_1 прямым методом показывают, что установившаяся скорость изменяется в интервале от 10^{-8} до 10^{-10} дол. ед./с в зависимости от величины напряжения, при котором проходит эксперимент. При достижении времени на ступени свыше 48 часов скорость деформирования согласуется со скоростью полученной в результате экспериментов проведенных прямым методом.

Определение скоростей деформирования методом ступенчатого нагружения показывает, что при времени ступени от 5 мин до 48 часов, скорость изменяется в интервале от 10^{-6} до 10^{-8} дол. ед./с. Исходя из выше изложенного, можно сделать вывод, что проводить эксперименты с величиной ступени меньше 48 часов некорректно, так как скорости деформирования значительно выше скоростей полученных в результате экспериментов проведенных прямым методом. На рисунке 2.17 представлены данные из таблицы 2.2 и 2.3

a)



б)

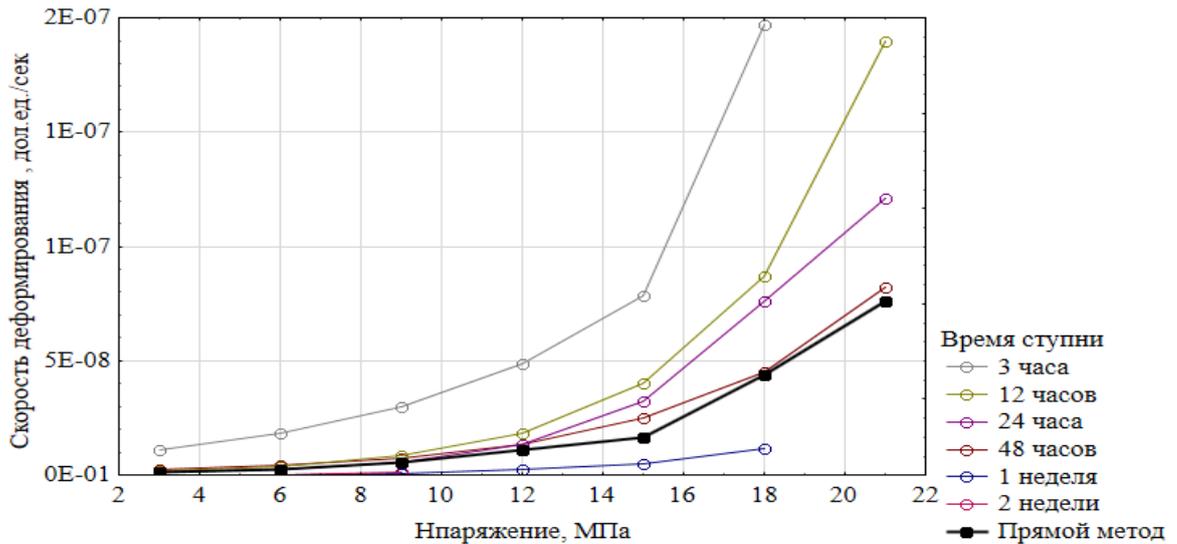


Рисунок 2.17 – График зависимости скорости продольного деформирования v_1 от осевого напряжения σ_1 , рассчитанные по результатам испытаний, проведенных методом ступенчатого одноосного нагружения и прямым методом

Анализ этих графиков позволяет сделать вывод, что при увеличении времени на ступени, скорости на ступенях стремятся к скорости полученным в экспериментах, проведенных прямым методом. При времени на ступени равной 48 часам скорость максимально близко совпадает со скоростью деформирования, полученной прямым методом. При увеличении времени на ступени скорости деформирования уменьшаются, это вызвано тем, что при малом времени ступени напряжения в образце не успевают перераспределиться. Закрытие микротрещин не успевает произойти и задается новая ступень нагружения, это вызывает быстрый рост деформаций. В связи с вышеизложенным можно утверждать, что для проведения ступенчатой ползучести необходимое количество времени на ступени должно быть не менее 48 часов.

Отдельно можно выделить тот факт, что в длительных экспериментах в режиме ступенчатого нагружения на каждой ступени происходит накопление деформаций [65-67]. При этом максимальное напряжение σ_{max} ,

при которых происходит разрушение образца изменяется незначительно, это подтверждается проведенными экспериментами. В частности, это можно отследить построив полные диаграммы деформирования по данным, полученным из экспериментов в режиме ступенчатого нагружения. Диаграммы деформирования с разным временем проведения эксперимента продемонстрированы на рисунке 2.18.

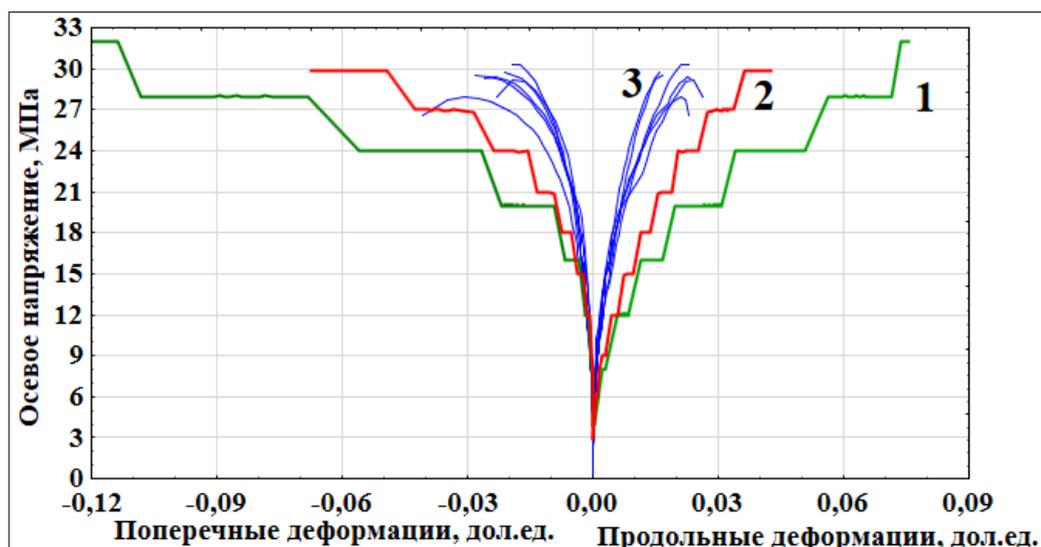


Рисунок 2.18 – Диаграммы деформирования образцов каменной соли в режиме быстрого и ступенчатого нагружения. 1 – время проведения эксперимента 56 дней; 2- 10 дней; 3 – время проведения эксперимента 2 мин.

Таблице 2.4 - Значения критических деформаций при которых произошло разрушение

Режим нагружения	Время проведения эксперимента	Максимальные продольные деформации, дол. ед.	Максимальные поперечные деформации, дол. ед.
Непрерывное нагружение со скоростью 0,5 МПа/с	2 мин	0,19	-0,02
Ступенчатое нагружение, величина ступени 3 МПа	10 дней	0,04	-0,067
Ступенчатое нагружение, величина ступени 4 МПа	56 дней	0,07	-0,12

Несмотря на накопленные деформации, в ходе экспериментов в режиме ступенчатого нагружения, в результате экспериментов достигаются

напряжения такие же, как и в экспериментах при быстром сжатии. Это объясняется тем, что в образце происходит перераспределение напряжений. Если образец достиг таких деформаций, при которых происходит разрушение в режиме быстрого нагружения, то в случае ступенчатого нагружения не происходит разрушения. Это еще раз подтверждает правомерность выполнения испытаний в режиме ступенчатого нагружения.

2.3.2 Обоснование величины напряжения на ступени при проведении экспериментов в режиме ступенчатого нагружения

В связи с необходимостью выбора величины ступени нагрузки были проведены эксперименты со ступенями нагрузки 0,5 МПа, 3 МПа. Оценивались начальные ступени. Особо стоит отметить тот факт, что на начальных ступенях нагружения, когда нагрузки значительно меньше предельных значений, деформации растут очень медленно. Скорости деформирования минимальны и не представляют собой практического интереса. Для наглядности на рисунке 2.19 представлены кривые изменения продольного деформирования во времени при постоянной нагрузке.

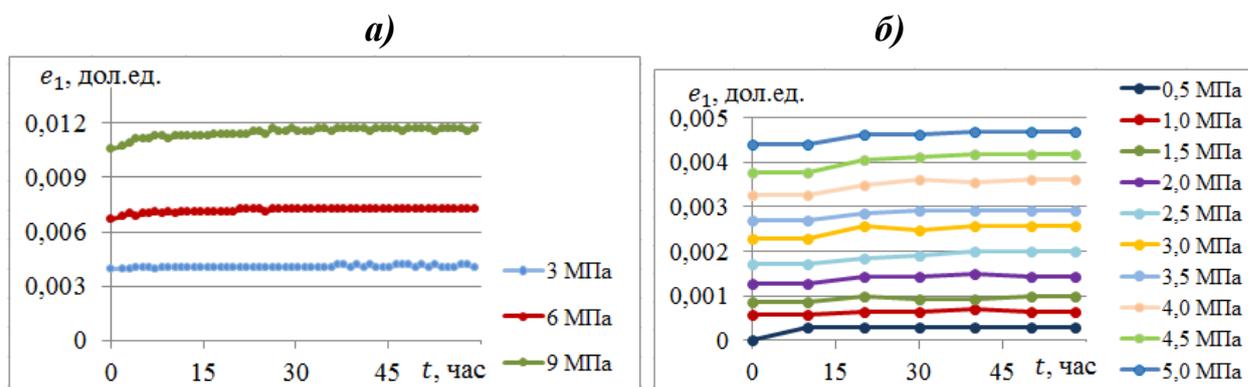


Рисунок 2.19 – Графики зависимости продольных деформаций образца каменной соли: а) – величина нагрузки на ступени 3 МПа; б) - величина нагрузки на ступени 0,5 МПа

Анализ графиков а) доказывает тот факт, что проводить эксперименты с нагрузкой до 5 МПа для каменной соли нецелесообразно, так как деформации растут очень медленно или вообще не растут, о чем

свидетельствуют прямые линии на графике деформирования. Такие деформации очень сложно измерить практически, для этого необходимо оборудование с точностью более 0,005 мм. Данные эксперименты требуют больших трудозатрат и при этом имеют малую информативность.

Наряду с полученными результатами отмечаем, что кроме минимальных нагрузок стоит выделить наиболее информативный интервал напряжений, в котором нужно проводить эксперименты. В связи с этим, чтобы оценить в какой момент происходит значительное увеличение скорости деформирования образца были построены графики зависимости объемных деформаций e_v и скорости продольного деформирования v_1 от напряжения. Указанные особенности деформирования представлены на рисунке 2.20.

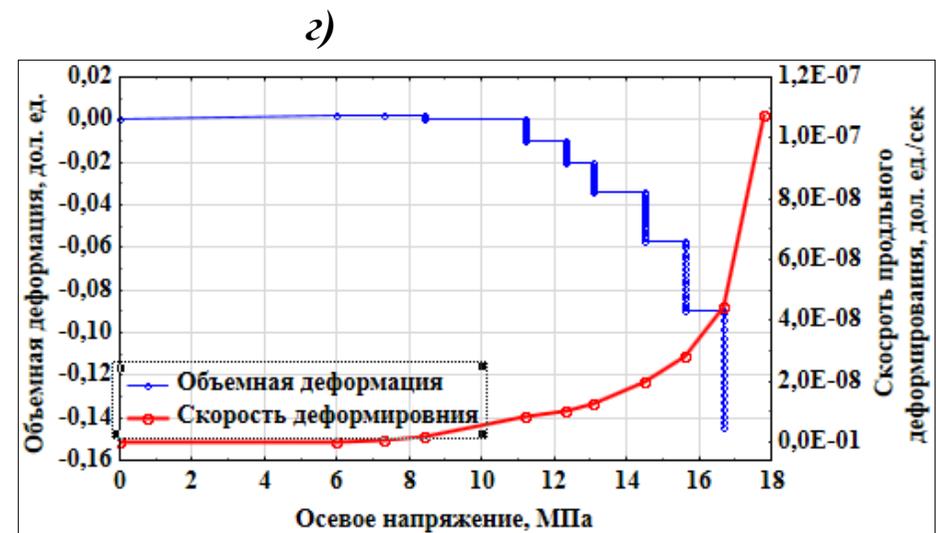
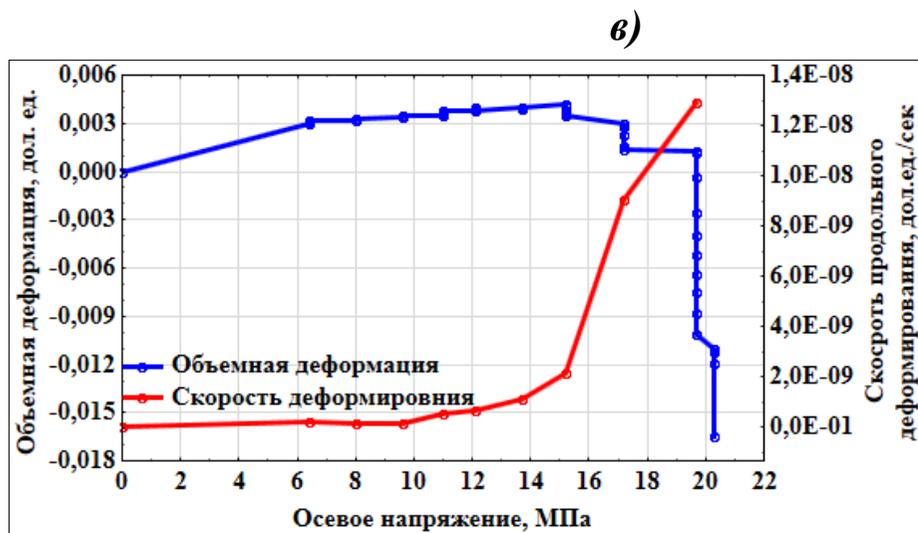
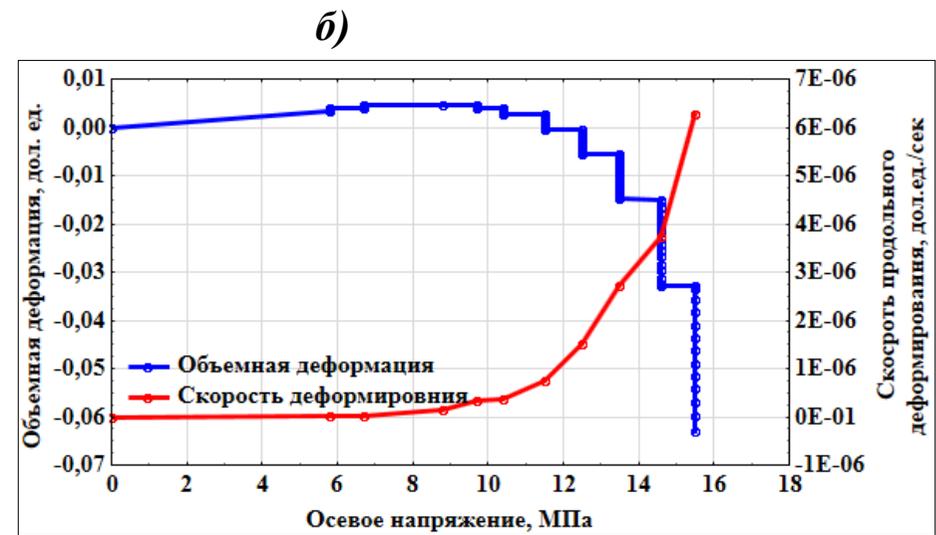
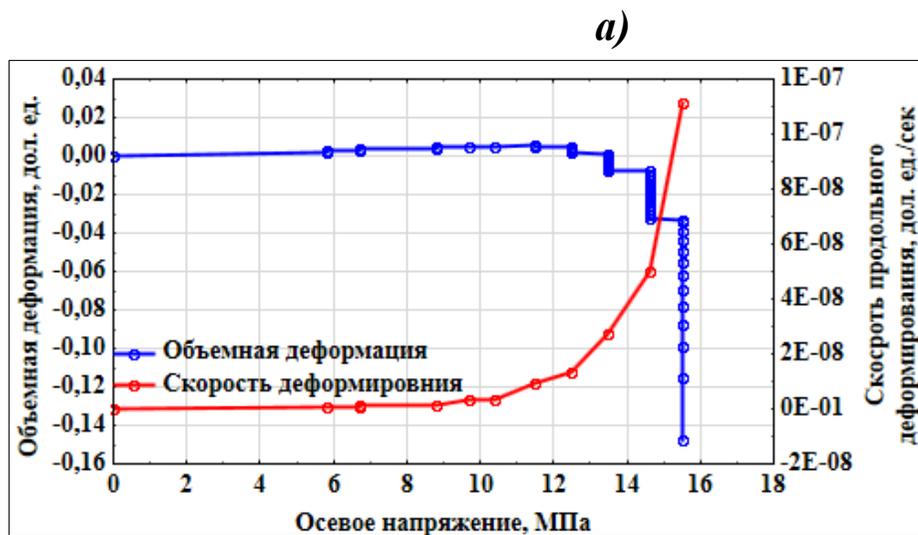


Рисунок 2.20 – Графики зависимости скорости продольного деформирования образца и объемных деформаций от осевого напряжения

Ниже приведены результирующие данные рисунка 2.20 в табличном виде.

Таблица 2.5 – Результаты определения скоростей деформирования

Рисунок	Напряжение σ , МПа	Объемные деформации e_v , дол. ед.	Скорость продольного деформирования v_1 , дол. ед./с	Отношение скоростей на ступенях к скорости на первой ступени, $\frac{v_n}{v_1}$
а)	5,8	$3,16 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-10}$	
	6,7	$3,84 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	2
	8,8	$4,52 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-9}$	4
	9,7	$4,95 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$	5
	10,4	$5,19 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	22
	11,5	$4,57 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	43
	12,5	$1,52 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	78
	13,5	$-7,41 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	175
	14,6	$-3,27 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	458
б)	5,8	$4,13 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	
	6,7	$4,56 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	0,9
	8,8	$4,77 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	11,1
	9,7	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	23,1
	10,4	$2,82 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	25,9
	11,5	$-2,96 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-7}$	53,0
	12,5	$-5,42 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	107,6
	13,5	$-1,49 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	193,2
	14,6	$-3,27 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	267,7
в)	6,4	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$	
	8	$3,31 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	0,6
	9,6	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$	0,7
	11	$3,75 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$	3,1
	12,1	$3,83 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-10}$	3,9
	13,7	$3,98 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	6,5
	15,2	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$	12,7
	17,2	$1,35 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-9}$	54,2
	19,7	$-1,01 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	77,5
20,3	$-4,07 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	1075,5	
г)	6	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,39 \cdot 10^{-10}$	
	7,3	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$8,72 \cdot 10^{-10}$	3,7
	8,4	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-9}$	8,4
	11,2	$-9,9 \cdot 10^{-3}$	$8,39 \cdot 10^{-9}$	35,1
	12,3	$-2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$	42,7
	13,1	$-3,4 \cdot 10^{-2}$	$1,23 \cdot 10^{-8}$	51,7
	14,5	$-5,7 \cdot 10^{-2}$	$2,01 \cdot 10^{-8}$	84,1
	15,6	$-9,0 \cdot 10^{-2}$	$2,85 \cdot 10^{-8}$	119,5
16,7	$-1,4 \cdot 10^{-1}$	$4,47 \cdot 10^{-8}$	187,3	

Отметим, что при минимальных нагрузках на первых ступенях образец очень медленно накапливает деформации и скорость деформирования имеет значения на порядки ниже чем на последующих ступенях. Данные ступени деформирования не представляют практического

интереса с точки зрения получения необходимых параметров для уравнения степенной ползучести. Однако необходимо отметить, что в ходе эксперимента нагрузки на ступенях должны попадать в интервалы до того когда образец переходит в стадию разуплотнения и после него. Под моментом разуплотнения понимается момент, когда образец во время эксперимента начинает увеличиваться в объеме. Нагрузка при этом соответствует пределу длительной прочности σ^∞ .

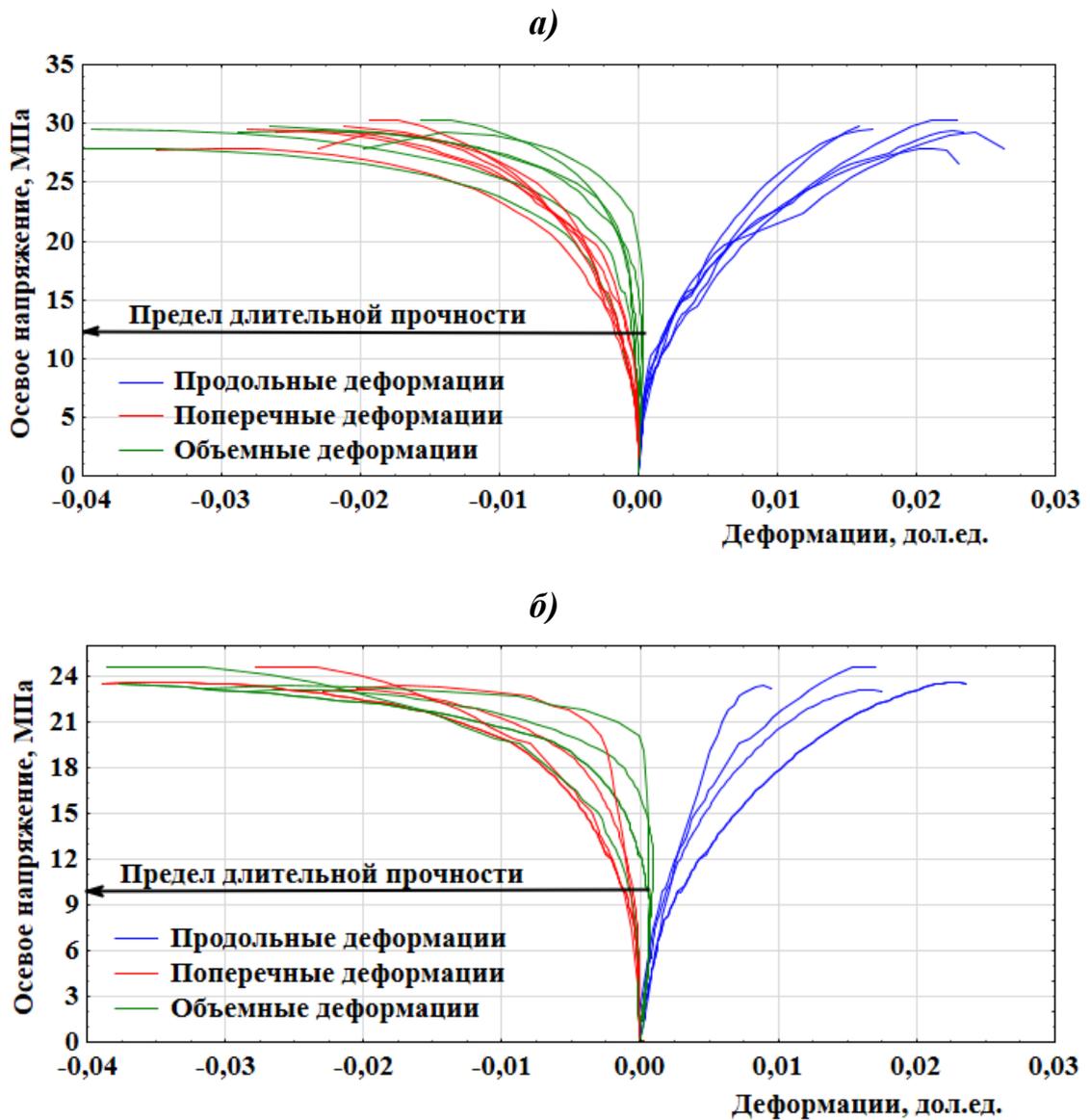


Рисунок 2.21 – Диаграммы деформирования образцов каменной соли. Для различных месторождений

Результаты испытаний по определению предела длительной прочности методом объемных деформаций представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты определения предела длительной прочности методом объемных деформаций

Месторождение	Предел прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$, МПа	Предел длительной прочности σ^{∞} , МПа	$\frac{\sigma^{\infty}}{\sigma_{сж}}$
Рис. 2.21 а)	29,2	12,5	0,42
Рис. 2.21 б)	23,9	10	0,41

Анализ приведенных данных показывает, что напряжение, при котором предел длительной прочности к пределу прочности не превышает 50% от прочности на сжатие $\sigma_{сж}$. С точки зрения практического применения данных и дальнейшего повышения информативности экспериментальных данных следует понимать, что степень нагрузки не должна превышать 40-50% от прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$.

Эксперименты, проводимые в режиме ступенчатого нагружения так или иначе выполняются для того, чтобы получить кривые ползучести каменной соли. Под кривым ползучести понимается графическое представление данных изменения продольных деформаций во времени. По данным кривых ползучести производится определение реологические характеристики. Описание ползучести может производиться различными способами. Но сводятся они к тому, чтобы получить зависимости скорости деформаций от напряжений с течением времени. Как уже отмечалось ранее в работе, разработанные программные комплексы реализуют различные модели ползучести. В данной работе рассматривался ассоциативный закон ползучести. В этой модели реализовано классический степенной закон ползучести.

$$\dot{\varepsilon}_i = A \cdot (\sigma_i)^n \cdot t^m \quad (2.6)$$

В данном уравнение учувствует параметр n , он учитывает влияние уровня напряженного состояния на скорость ползучести. В связи с этим необходимо получить зависимости напряженного состояния на скорость деформирования. В данной части работы проведен анализ изменения

скорости продольной деформации от напряженного состояния. В дальнейшем данные зависимости возможно интерпретировать под необходимые задачи и модели.

На рисунке 2.22 представлены результаты испытания методом ступенчатого нагружения. Время на каждой ступени составляло 48 часов, напряжение увеличивалось при переходе на следующую ступень на 0,5 МПа. По результатам проведенных экспериментов была определена зависимость изменения скорости продольного деформирования от напряжения на ступени.

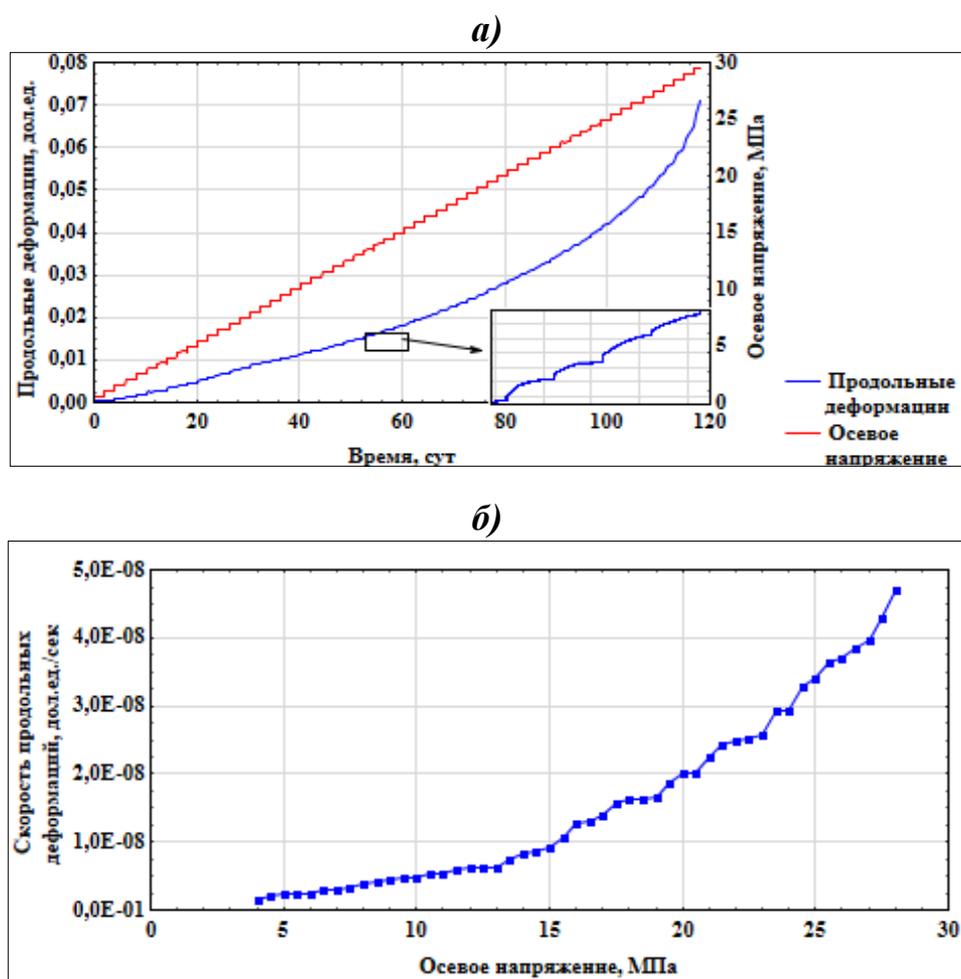


Рисунок 2.22 – Экспериментальные данные испытания образца каменной соли в режиме ступенчатого нагружения с временем (t) на каждой ступени равным 48 часам и шагом ступени 0,5 МПа (а), и зависимости изменения скорости продольного деформирования (v_1) от осевого напряжения σ_1

На графике 2.23 представлены результаты испытания методом ступенчатого нагружения. Время на каждой ступени составляло 48 часов, напряжение увеличивалось при переходе на следующую ступень на 0,7 МПа. По результатам проведенных экспериментов была определена зависимость изменения скорости продольного деформирования от напряжения на ступени.

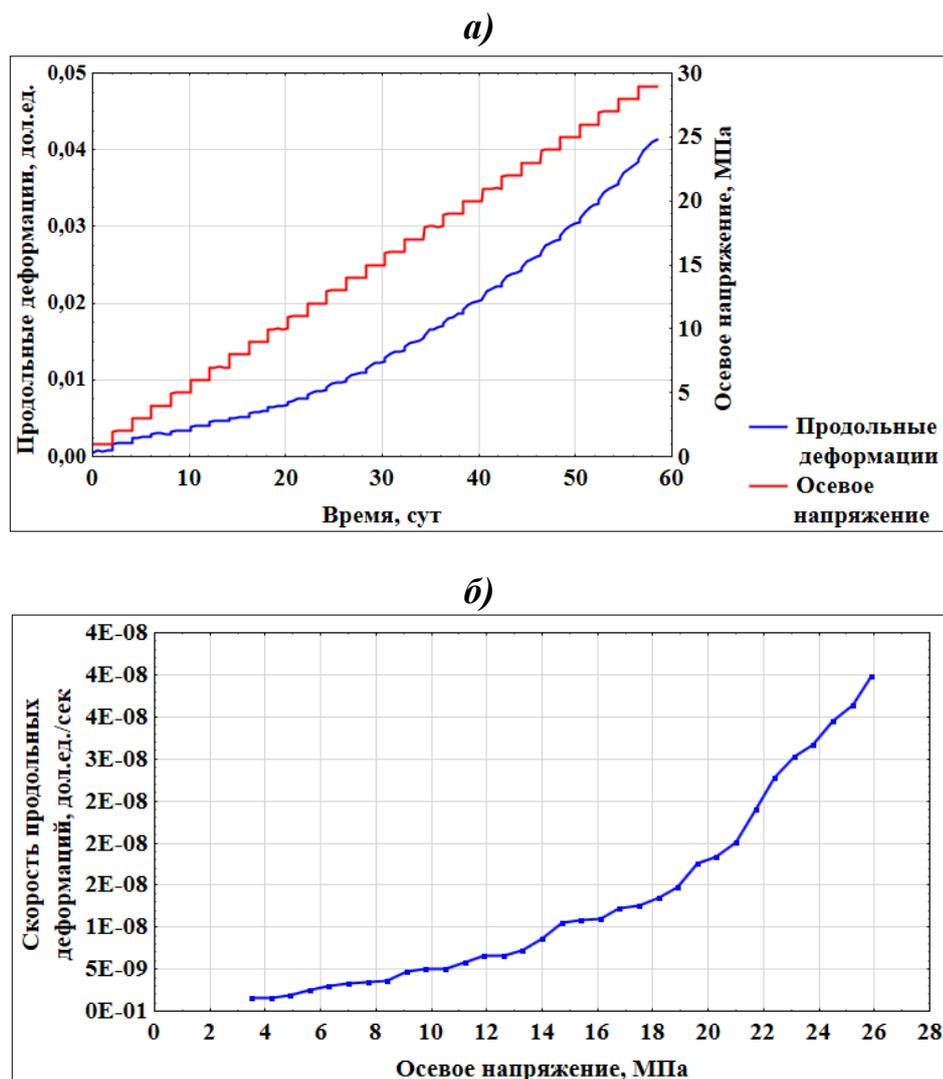


Рисунок 2.23 – Экспериментальные данные испытания образца каменной соли в режиме ступенчатого нагружения с временем (t) на каждой ступени равным 48 часам и шагом ступени 0,7 МПа (a), и зависимости изменения скорости продольного деформирования (v_1) от осевого напряжения σ_1

На графике 2.24 представлены результаты проведения испытания методом ступенчатого нагружения. Время на каждой ступени составляло 48 часов, напряжение увеличивалось при переходе на следующую ступень на 3 МПа. По результатам проведенных экспериментов была определена зависимость изменения скорости продольного деформирования от напряжения на ступени.

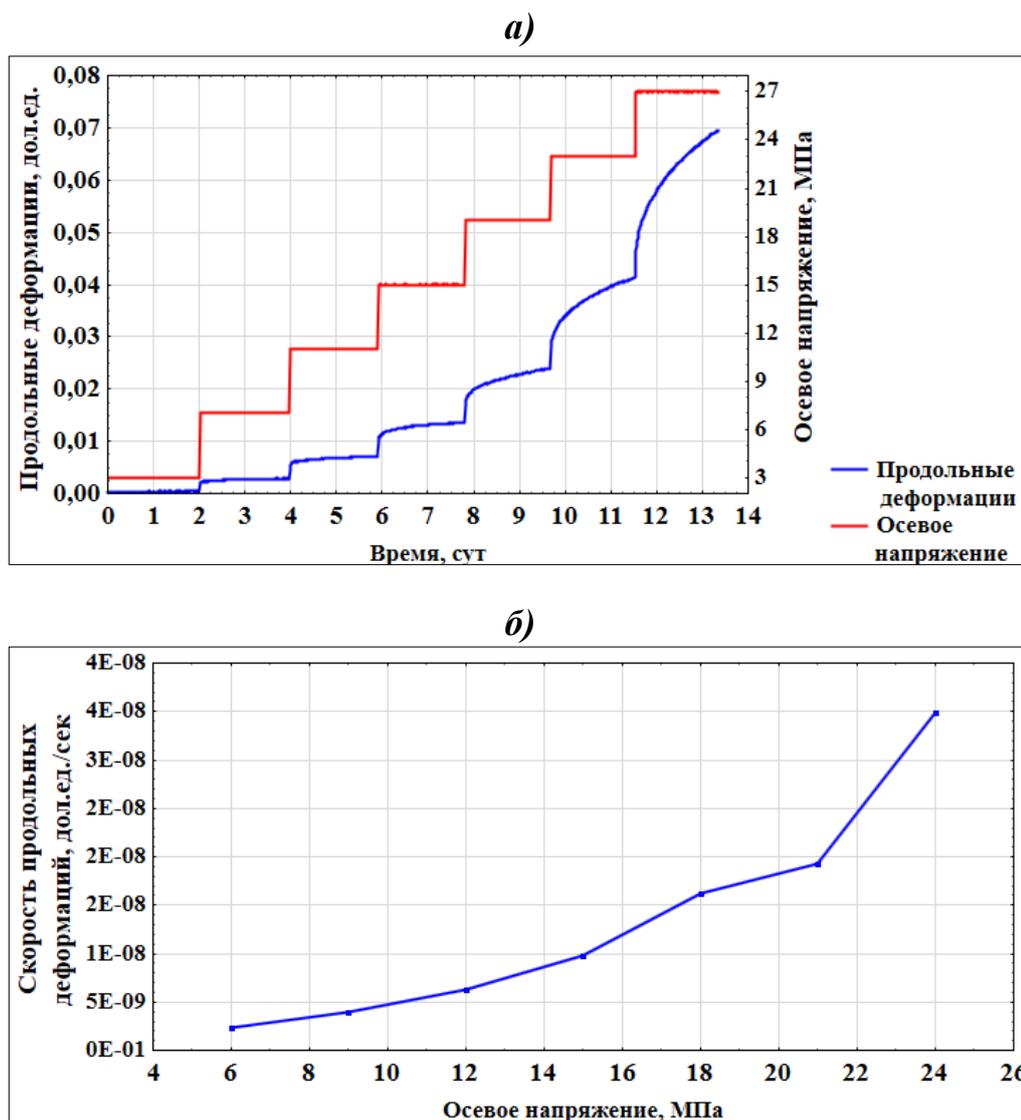


Рисунок 2.24 – Испытание образца каменной соли в режиме ступенчатого нагружения с временем (t) на каждой ступени равным 48 часам и шагом ступени 3 МПа (*а*), и зависимости изменения скорости продольного деформирования (v_1) от осевого напряжения σ_1

Результаты проведенных экспериментов, представленные на рисунках 2.22, 2.23 и 2.24 свидетельствуют о том, что изменение величины ступени несущественно влияет на определение зависимости изменения скорости продольного деформирования. Это наглядно видно на графике, где отображены зависимости изменения скорости продольного деформирования v_1 от осевого напряжения σ_1 при разной величине ступени нагружения.

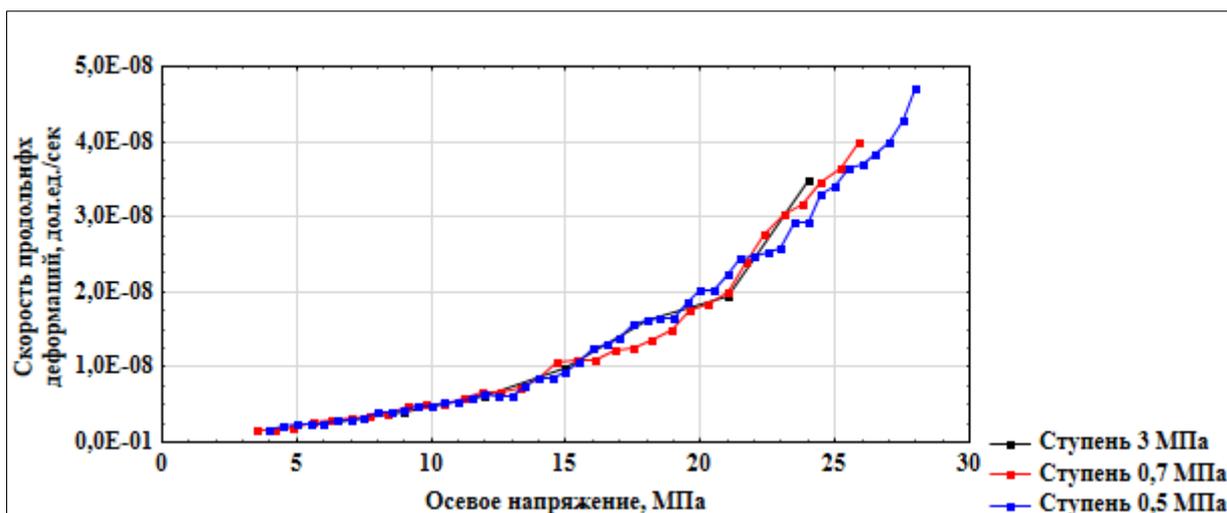


Рисунок 2.25 – Испытание образца каменной соли в режиме ступенчатого нагружения с временем (t) на каждой ступени равным 48 часам и шагом ступени 3 МПа, 0,7 МПа и 0,5 МПа, и зависимости изменения скорости продольного деформирования (v_1) от осевого напряжения σ_1

Ниже в таблице 2.6 приведены скорости продольных деформаций v_1 в зависимости от осевого напряжения σ_1 .

Таблица 2.6 – Расчётные значения

Шаг ступени $\sigma_n=3$ МПа		Шаг ступени $\sigma_n=0,7$ МПа		Шаг ступени $\sigma_n=0,5$ МПа	
σ_1 , МПа	v_1 , дол.ед./с	σ_1 , МПа	v_1 , дол.ед./с	σ_1 , МПа	v_1 , дол.ед./с
6,0	$2,28 \cdot 10^{-9}$	3,5	$1,51 \cdot 10^{-9}$	4	$1,50 \cdot 10^{-9}$
9,0	$3,98 \cdot 10^{-9}$	4,2	$1,62 \cdot 10^{-9}$	4,5	$2,20 \cdot 10^{-9}$
12,0	$6,23 \cdot 10^{-9}$	4,9	$1,85 \cdot 10^{-9}$	5,0	$2,30 \cdot 10^{-9}$
15,0	$9,75 \cdot 10^{-9}$	5,6	$2,57 \cdot 10^{-9}$	5,5	$2,40 \cdot 10^{-9}$
18,0	$1,61 \cdot 10^{-8}$	6,3	$3,01 \cdot 10^{-9}$	6,0	$2,50 \cdot 10^{-9}$
21,0	$1,93 \cdot 10^{-8}$	7,0	$3,33 \cdot 10^{-9}$	6,5	$2,84 \cdot 10^{-9}$
24,0	$3,48 \cdot 10^{-8}$	7,7	$3,44 \cdot 10^{-9}$	7,0	$2,85 \cdot 10^{-9}$
-	-	8,4	$3,68 \cdot 10^{-9}$	7,5	$3,20 \cdot 10^{-9}$
-	-	9,1	$4,72 \cdot 10^{-9}$	8,0	$4,01 \cdot 10^{-9}$
-	-	9,8	$4,95 \cdot 10^{-9}$	8,5	$4,10 \cdot 10^{-9}$
-	-	10,5	$5,08 \cdot 10^{-9}$	9,0	$4,40 \cdot 10^{-9}$
-	-	11,2	$5,86 \cdot 10^{-9}$	9,5	$4,70 \cdot 10^{-9}$
-	-	11,9	$6,58 \cdot 10^{-9}$	10	$4,90 \cdot 10^{-9}$
-	-	12,6	$6,65 \cdot 10^{-9}$	10,5	$5,31 \cdot 10^{-9}$
-	-	13,3	$7,28 \cdot 10^{-9}$	11,0	$5,45 \cdot 10^{-9}$
-	-	14,0	$8,60 \cdot 10^{-9}$	11,5	$5,90 \cdot 10^{-9}$
-	-	14,7	$1,05 \cdot 10^{-8}$	12,0	$6,28 \cdot 10^{-9}$
-	-	15,4	$1,07 \cdot 10^{-8}$	12,5	$6,10 \cdot 10^{-9}$
-	-	16,1	$1,09 \cdot 10^{-8}$	13,0	$6,22 \cdot 10^{-9}$
-	-	16,8	$1,22 \cdot 10^{-8}$	13,5	$7,40 \cdot 10^{-9}$
-	-	17,5	$1,26 \cdot 10^{-8}$	14,0	$8,40 \cdot 10^{-9}$
-	-	18,2	$1,35 \cdot 10^{-8}$	14,5	$8,60 \cdot 10^{-9}$
-	-	18,9	$1,48 \cdot 10^{-8}$	15,0	$9,20 \cdot 10^{-9}$
-	-	19,6	$1,75 \cdot 10^{-8}$	15,5	$1,06 \cdot 10^{-8}$
-	-	20,3	$1,82 \cdot 10^{-8}$	16,0	$1,26 \cdot 10^{-8}$
-	-	21,0	$2,00 \cdot 10^{-8}$	16,5	$1,31 \cdot 10^{-8}$
-	-	21,7	$2,40 \cdot 10^{-8}$	17,0	$1,38 \cdot 10^{-8}$
-	-	22,4	$2,78 \cdot 10^{-8}$	17,5	$1,57 \cdot 10^{-8}$
-	-	23,1	$3,02 \cdot 10^{-8}$	18,0	$1,62 \cdot 10^{-8}$
-	-	23,8	$3,16 \cdot 10^{-8}$	18,5	$1,64 \cdot 10^{-8}$
-	-	24,5	$3,45 \cdot 10^{-8}$	19,0	$1,66 \cdot 10^{-8}$
-	-	25,2	$3,64 \cdot 10^{-8}$	19,5	$1,87 \cdot 10^{-8}$
-	-	25,9	$3,98 \cdot 10^{-8}$	20,0	$2,02 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	20,5	$2,01 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	21,0	$2,23 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	21,5	$2,44 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	22,0	$2,43 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	22,5	$2,52 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	23,0	$2,57 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	23,5	$2,92 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	24,0	$2,92 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	24,5	$3,29 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	25,0	$3,40 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	25,5	$3,63 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	26,0	$3,70 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	26,5	$3,83 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	27,0	$3,97 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	27,5	$4,27 \cdot 10^{-8}$
-	-	-	-	28,0	$4,69 \cdot 10^{-8}$

Представленные результаты экспериментальных данных свидетельствуют о том, что скорости продольного деформирования v_1

незначительно отличаются в зависимости от шага ступени σ_n . Установленное позволяют рассматривать кривую скорости продольного деформирования v_1 от осевого напряжения σ_1 , полученную в результате обработки экспериментальных данных, с наибольшим количеством ступеней как базисную. На данной кривой максимальное количество точек, соответствующих ступеням нагружения. Базисную кривую опишем уравнением экспоненциальной функции $f(v_1) = a_1 \cdot \exp^{a_2 \cdot v_1}$. Результат представлен на рисунке 2.26.

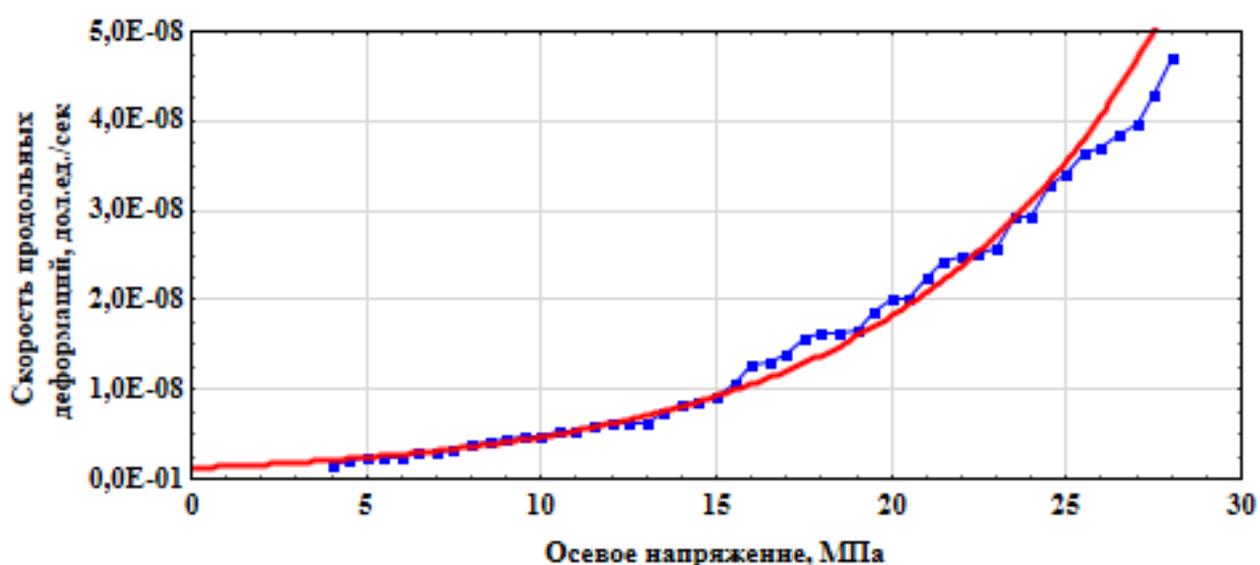


Рисунок 2.26 – Описание зависимости изменения скорости продольного деформирования (v_1) от осевого напряжения σ_1 уравнением функции $f(v_1) = a_1 \cdot \exp^{a_2 \cdot v_1}$.

Набор значений, полученных при описании уравнением экспоненциальной функции, умножаем на коэффициент 0,85 и 1,15. Результаты расчета позволяют установить доверительный интервал с точностью 15% от базисной зависимости.

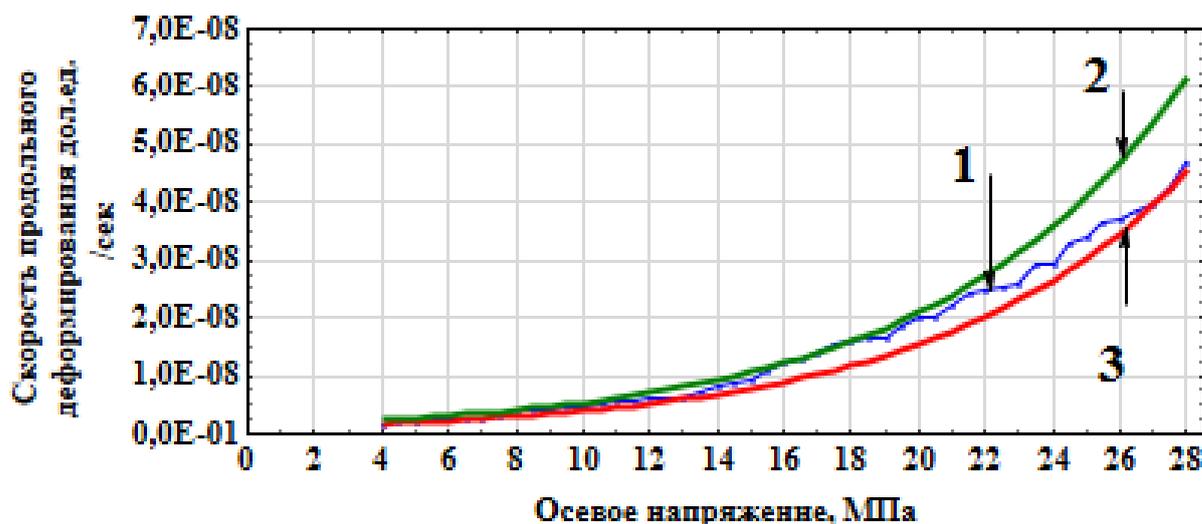


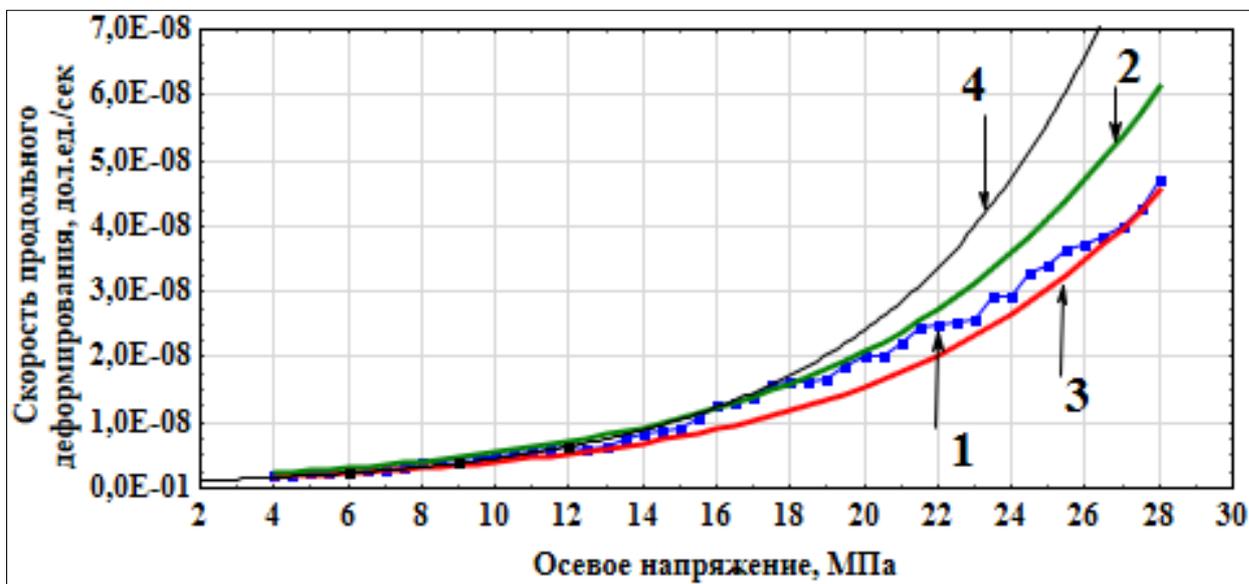
Рисунок 2.27 – Доверительный интервал от набора данных эталонной кривой. 1- расчётные данные из эксперимента, 2 – данные эталонной кривой умноженные на 1,15, 3 - данные эталонной кривой умноженной на 0,85

Полученные зависимости следует интерпретировать следующим образом. В том случае, если провести эксперименты в режиме ступенчатого одноосного нагружения с различной величиной ступенчатого нагружения и расчётные значения будут выше линии 3 и ниже линии 2, то с погрешностью 15% можно утверждать, что зависимость определена верно. Напротив, в случае, когда расчётный график функции $f(v_1) = a_1 \cdot \exp^{a_2}$ выше линии 2 и ниже линии 3 точность измерения будет ниже 85%.

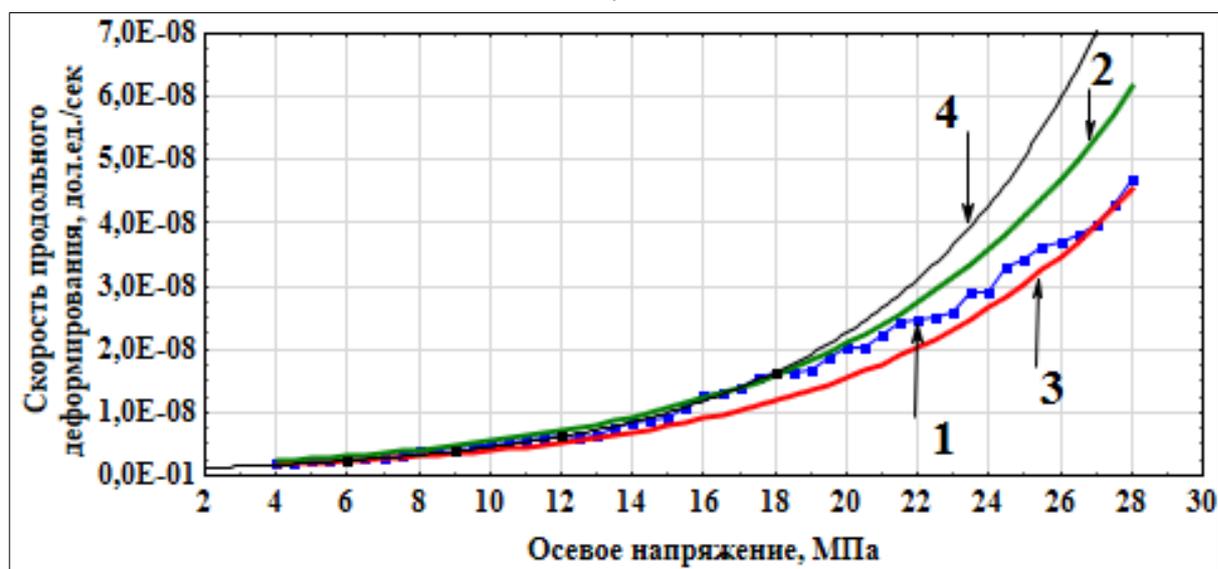
Суть проведенных экспериментов с количеством ступеней меньше чем у базисной сводится к следующему. Необходимо оценить, какое количество ступеней достаточно для того, чтобы данные соответствовали эталонным с погрешностью не более 15%. В связи с этим необходимо описать уравнением экспоненциальной функции $f(v_1) = a_1 \cdot \exp^{a_2}$ зависимости, полученные в результате экспериментов с количеством ступеней равным 7, шаг ступени в этом эксперименте составлял $\sigma_n = 3$ МПа. Расчёт производился начиная с трех экспериментальных точек. Далее, в случае непопадания графика функции в доверительный интервал, количество точек увеличивалось на одну. Процедура повторялась до момента, когда

график функции попал в доверительный интервал. На рисунке 2.28 представлены результаты проведенных расчётов.

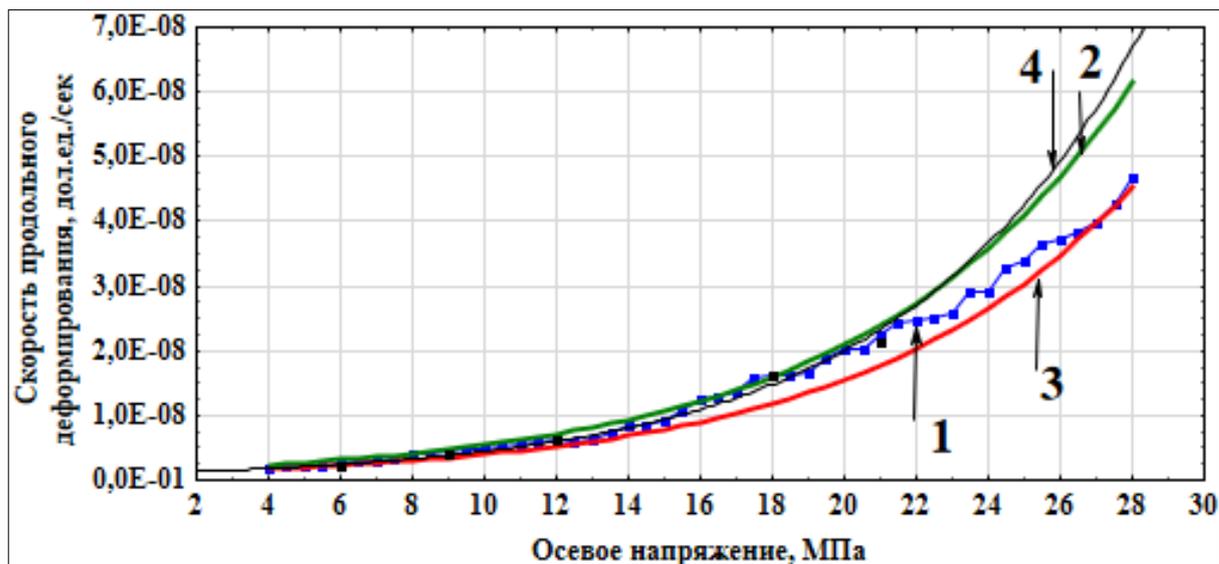
a)



б)



б)



г)

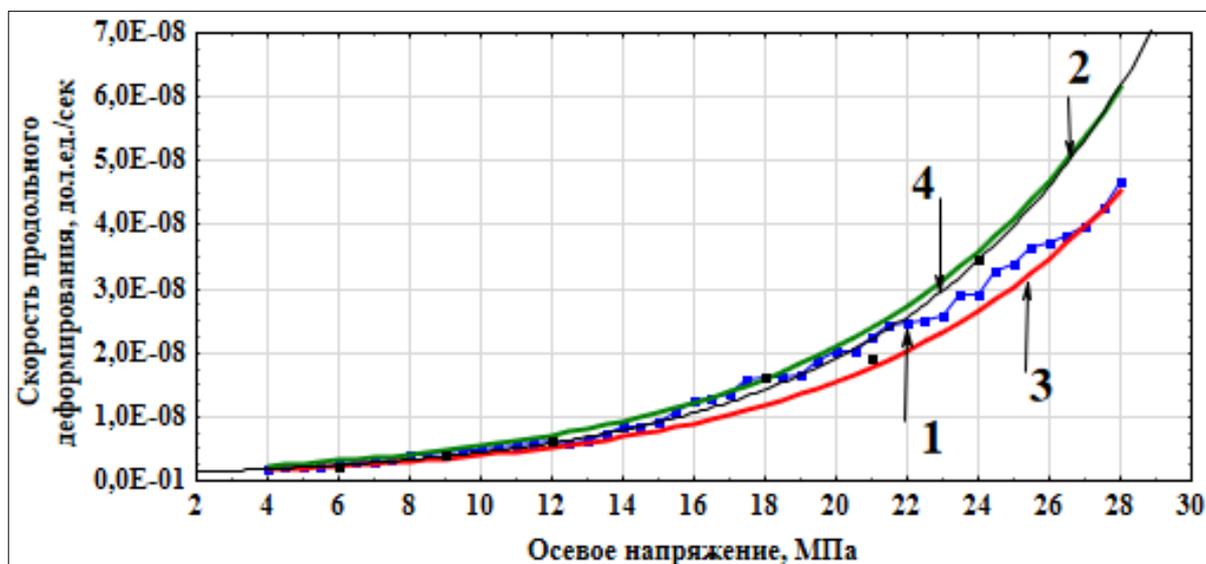


Рисунок 2.28 – Графики расчёта скорости деформирования по 3-м точкам (а), по 4-м точкам (б), по 5-ти точкам (в) и по 6-ти точкам (г). 1 – расчётные данные эксперимента, 2 – верхняя граница доверительного интервала, 3 – нижняя граница доверительного интервала, 4 – график функции описываемый по значениям эксперимента с шагом нагружения напряжения 3 МПа

Качественный анализ указанных графиков свидетельствует о возможности с погрешностью 15% возможно определить зависимость скорости продольного деформирования v_1 от осевого напряжения σ_1 в

результате экспериментов в режиме одноосного ступенчатого нагружения с временем t проведения на каждой ступени не менее 48 часов и количеством ступеней n не менее 6-ти.

2.4 Математическое описание испытаний методом ступенчатого нагружения

На основании полученных экспериментальных данных были построены графики зависимости продольных деформаций e_1 от времени t . Напряжения σ_1 изменялись в интервале от 3 МПа до 21 МПа с шагом 3 МПа. Это позволило получить 7 кривых ползучести, что является достаточным условием описания процесса деформирования образца каменной соли, в режиме испытания методом ступенчатого нагружения. Время продолжительности ступени составляло 60 часов. Кривые зависимости изменения продольных деформаций во времени представлены на рисунке 2.29. Выбор данных параметров проведения экспериментов в режиме ступенчатого нагружения обоснован выше в настоящей работе.

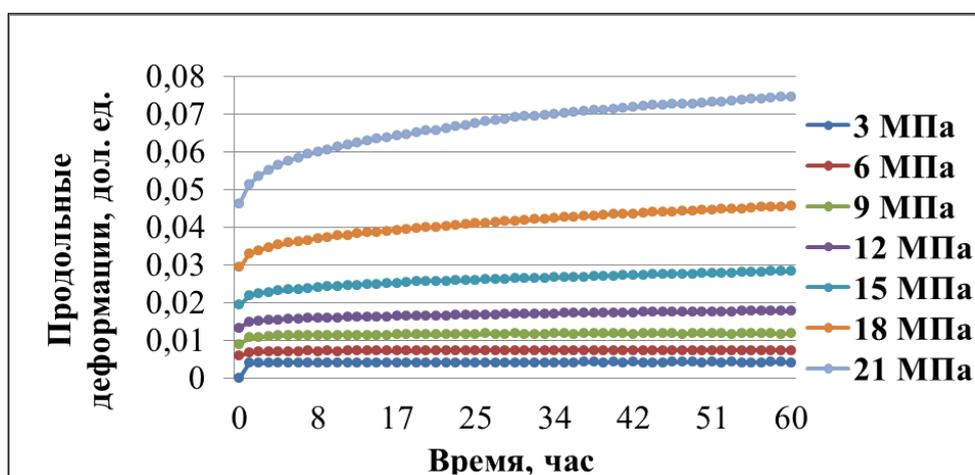


Рисунок 2.29 – График кривых ползучести продольных деформаций e_1 образцов каменной соли во времени t при различных напряжениях σ_1

При построении аналитического выражения использованы следующие предпосылки: рассмотрены деформации образца как функция с компонентами напряжения действующего на образец и время, в течении

которого действует напряжение, что вполне оправдано условиями проведения эксперимента.

$$e = f(\sigma) \cdot f(t) \quad (2.7)$$

Проанализированы полученные в ходе экспериментов зависимости продольных деформаций от времени степенной функцией:

$$e_1 = a_1 \cdot t^n \quad (2.8)$$

Анализируя кривые ползучести, получен набор кривых функций для различных напряжений. Стоит отметить, что степенная функция достаточно точно описывает кривую ползучести. Уравнения полученных функций представлены выборочно для значений $\sigma=3$ МПа, $\sigma=6$ МПа и $\sigma=18$ МПа. на рисунках 2.30, 2.31 и 2.32 соответственно.

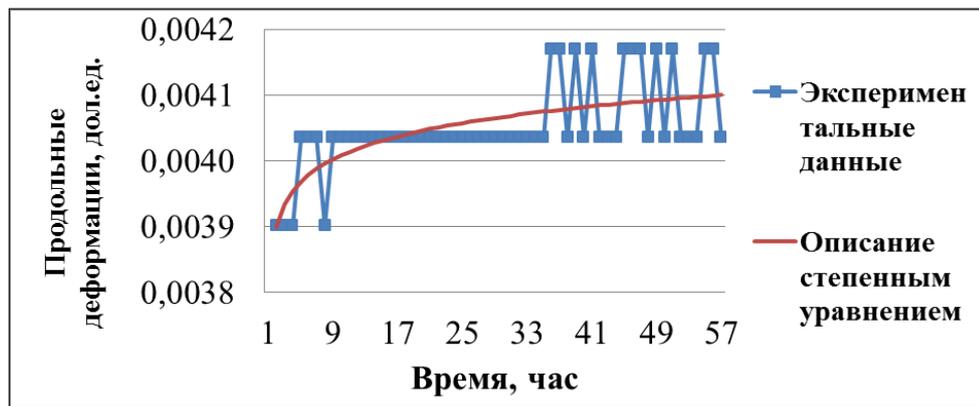


Рисунок 2.30- Описание кривой ползучести уравнением $e_1 = a_1 \cdot t^n$

при значении $\sigma=3$ МПа

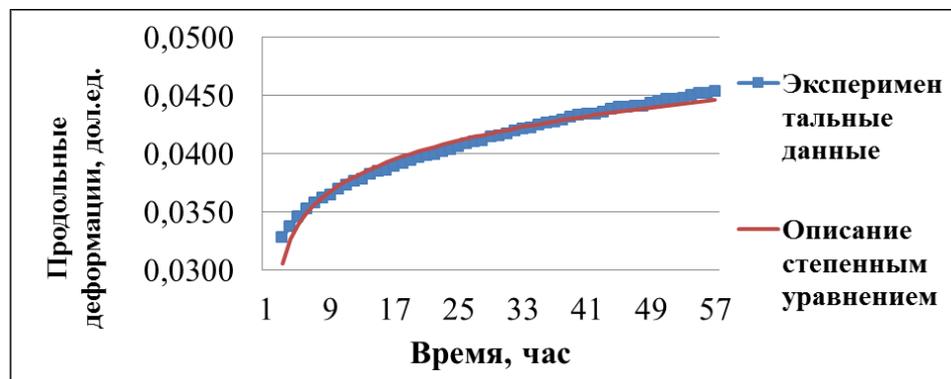


Рисунок 2.31- Описание кривой ползучести уравнением $e_1 = a_1 \cdot t^n$

при значении $\sigma=6$ МПа

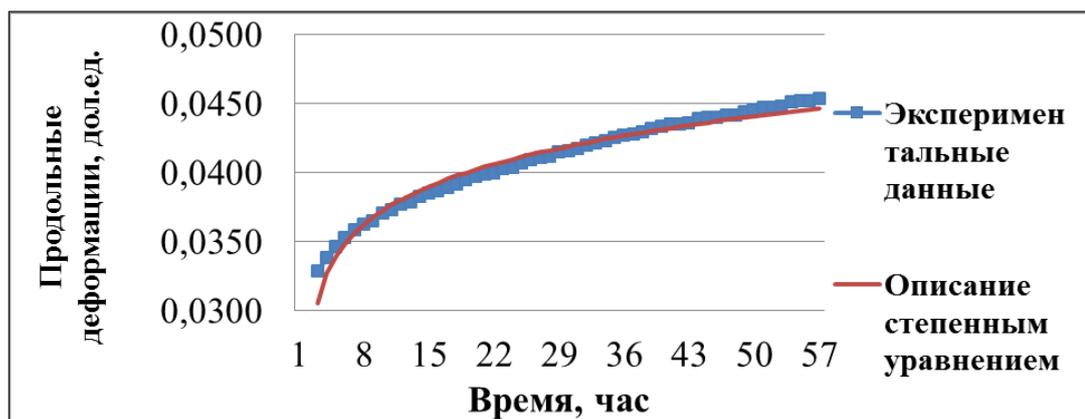


Рисунок 2.32- Описание кривой ползучести уравнением $e_1 = a_1 \cdot t^n$ при значении $\sigma=18$ МПа

Для дальнейшего анализа полученных данных значения всех коэффициентов a_1 и n приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Коэффициенты степенной функции $e_1 = a_1 \cdot t^n$ для экспериментов с временем эксперимента t равным 60 часам при различных напряжениях σ

Напряжение σ	a_1	n
3 МПа	0,003899	0,012266
6 МПа	0,006779	0,018170
9 МПа	0,010660	0,023341
12 МПа	0,014346	0,049942
15 МПа	0,020697	0,072241
18 МПа	0,030560	0,093434
21 МПа	0,048398	0,104316

Исходя из сформулированного ранее уравнения, дальнейшие исследования были направлены на определения зависимости степенного коэффициента n от напряжений σ . Чтобы наглядно оценить зависимость, результаты были представлены графически в координатах σ по оси абсцисс и n – ось ординат. График представлен на рисунке 2.33.

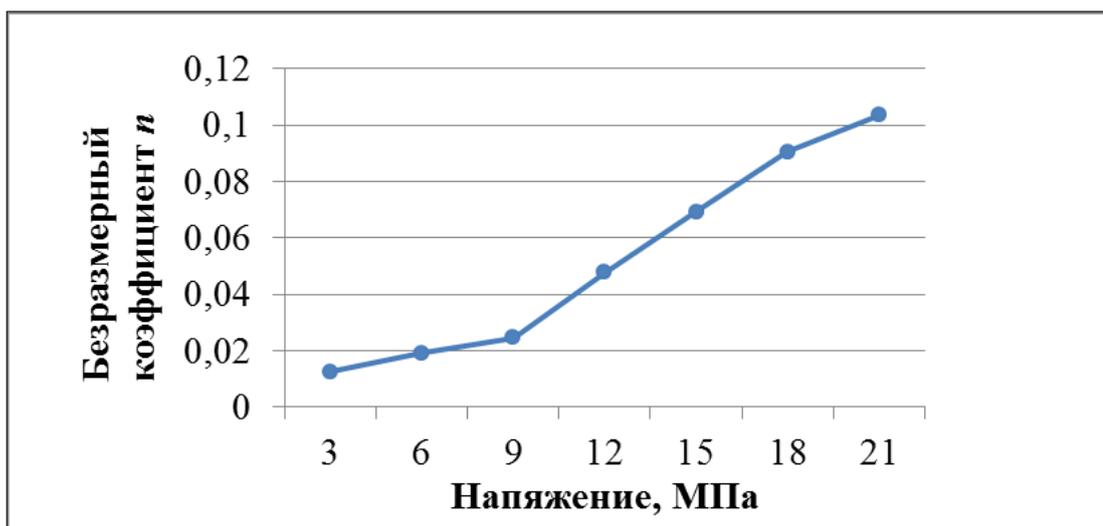


Рисунок 2.33 – График зависимости степенного коэффициента n от напряжений σ

Анализируя зависимость n от σ легко заметить, что до значения напряжения $\sigma=9$ МПа, характер значительно отличается от последующей зависимости при $\sigma \geq 9$ МПа. Переломный момент обусловлен тем, что при небольших значениях напряжений σ деформации образца достаточно малы и лежат в пределах средств измерений, о чем свидетельствует рис 2.30. Для определения зависимости рассмотрены участки с напряжениями, на которых деформации явно выражены, т.е. $\sigma >9$ МПа.

Чтобы оценить зависимость деформаций ϵ образца от напряжений σ , задаем коэффициент n в виде функции $n = f(\sigma)$. Будем рассматривать функцию как линейную зависимость в виде при значениях $\sigma \geq 9$ МПа:

$$n = k \cdot \sigma + b \quad (2.9)$$

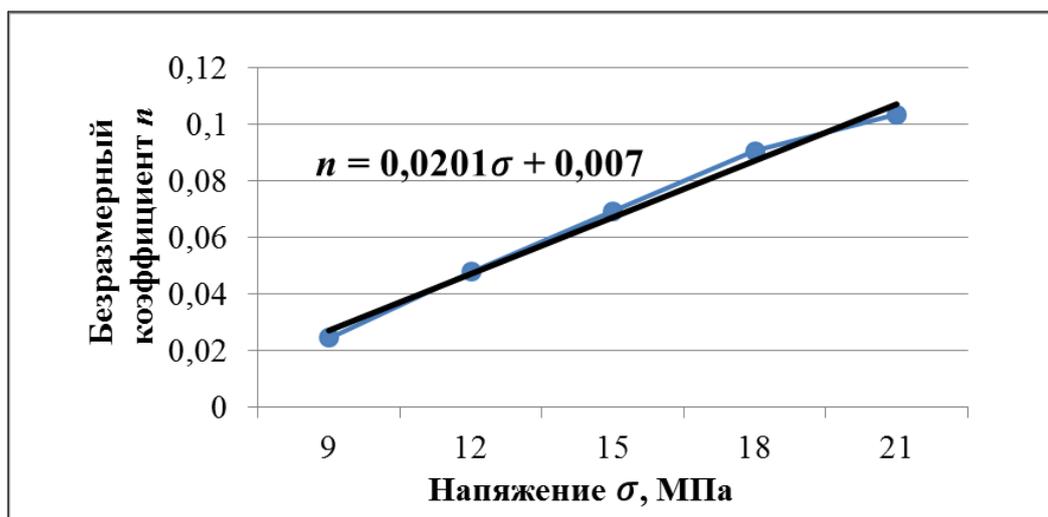


Рисунок 2.34– график зависимости степенного коэффициента n от напряжений σ с описанием линейной зависимости

Из анализа выражения следует, что значение степенного коэффициента n в уравнении $e_1 = a_1 \cdot t^n$ зависит от напряжений σ линейно. Численно для исследуемых данных: $n = k \cdot \sigma + b = 0,0201 \cdot \sigma + 0,007$.

После указанных исследований подставим полученные зависимости в исходное уравнение:

$$e = f(\sigma) \cdot t^{f(\sigma)} = f(\sigma) \cdot t^{0,0201 \cdot \sigma + 0,007} \quad (2.10)$$

Для определения первой части уравнения, а именно, определения зависимости коэффициента $a_1 = f(\sigma)$ представим графически зависимости a_1 от σ .

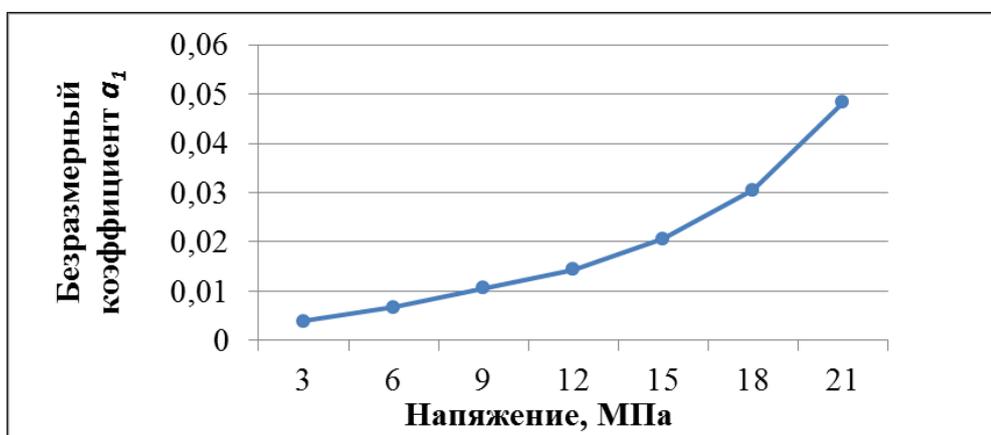


Рисунок 2.35 – график зависимости коэффициента a_1 из уравнения $e_1 = a_1 \cdot t^n$ от напряжений σ

В дальнейшем, чтобы задать зависимость a_1 от σ воспользуемся степенным уравнением $a_1 = m \cdot \sigma^l$.

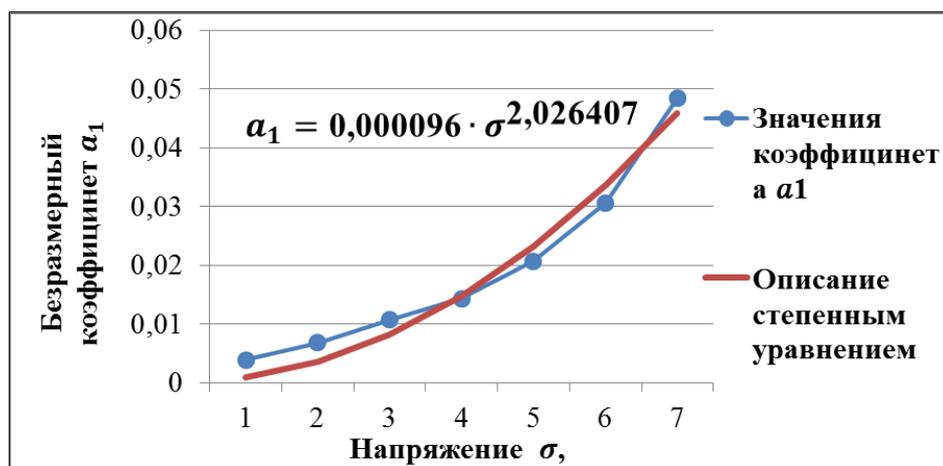


Рисунок 2.36 – График зависимости коэффициента a_1 из уравнения $e_1 = a_1 \cdot t^n$ от напряжений σ с описанием зависимости функцией $a_1 = m \cdot \sigma^l$

Исследования показывают, что коэффициент $a_1 = f(\sigma)$ достаточно точно описывается уравнением $a_1 = m \cdot \sigma^l$. Численные значения для данного исследования составляют $m = 0,000096$ и $l = 2,026407$.

После указанных выше преобразований получим замкнутое выражение для описания процесса ползучести при разных значениях напряжения в виде:

$$e = f(\sigma) \cdot f(t) = a_1 \cdot t^n = m \cdot \sigma^l \cdot t^{k \cdot \sigma + b} \quad (2.11)$$

Анализ рекомендуемого расчетного уравнения показывает: деформации образца зависят от напряжения прикладываемого на образец и времени, в течении которого происходит нагружение. Величина первоначальных деформаций описывается достаточно точно степенной функцией, что подтверждено на рисунке 2.36. Кривизна зависит от напряжения линейной функцией, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, отражено на рисунке 2.34. Чтобы убедиться в работоспособности рекомендуемого уравнения, проанализированы его граничные условия:

- 1) при $\sigma = 0$ (отсутствии нагрузки) деформации $e = 0$
- 2) при $t = 0$ (эксперимент не начался) $e = 0$

Стоит отметить, что рекомендуемое уравнение работает только до тех пор, пока образец не переходит в стадию прогрессирующей ползучести и не подвергается полному разрушению.

Данные по предлагаемому выражению описания ступенчатой ползучести приведем на рисунке 2.37.

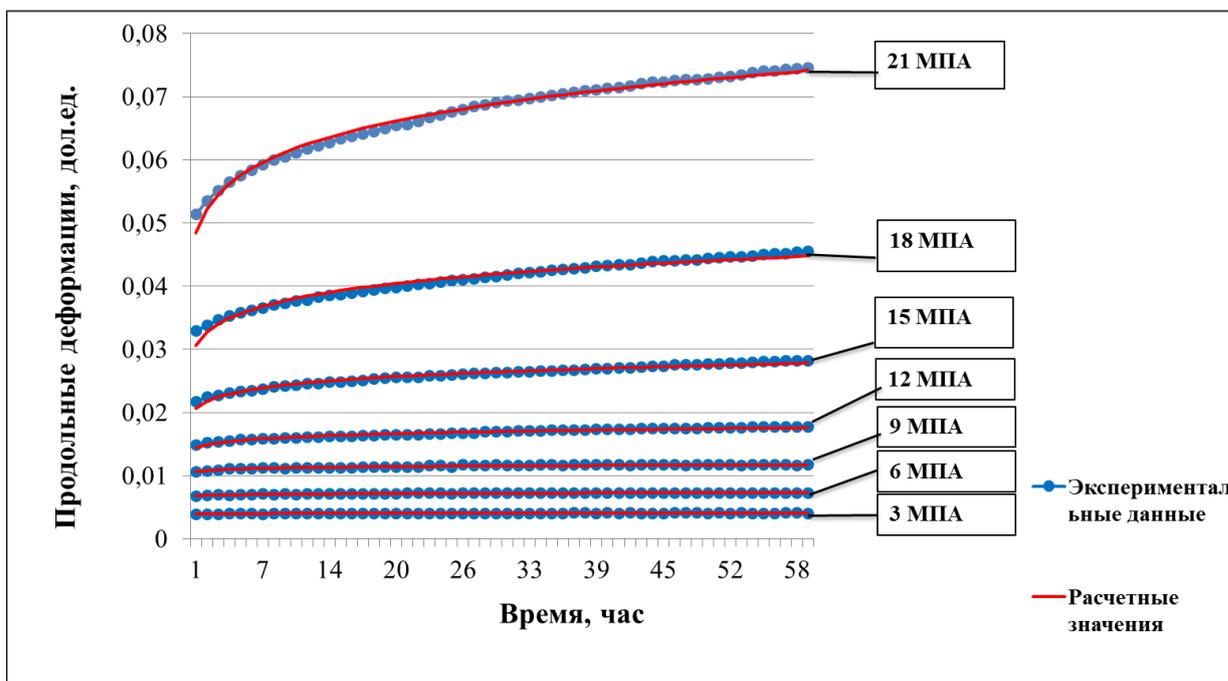


Рисунок 2.37– График кривых ползучести экспериментальных данных и расчётных значений по рекомендуемому выражению при различных напряжениях с временем ступени $t = 60$ часов

Установленные функциональные зависимости позволяют утверждать, что предложенное выражения описания процесса длительного испытания в режиме ступенчатого нагружения согласуется с экспериментальными данными. Это позволяет прогнозировать процесс деформирования образца при необходимых уровнях нагрузки на длительный промежуток времени.

Выводы к главе 2:

1. В качестве фактора определяющего степень нагружения при проведении экспериментов длительного деформирования методом ступенчатого нагружения, может выступать предварительное быстрое испытание схожих образцов каменной соли на сжатие, что позволяет

определить диапазон напряжений, в которых нужно исследовать данную каменную соль.

2. С целью получения надежной информации о зависимости скорости продольного деформирования от осевого напряжения при проведении экспериментов методом ступенчатого нагружения, которая согласуется с данными полученными в экспериментов проводимых прямым методом, необходимым является условие соблюдения выдержки времени постоянного напряжения на ступени не менее 48 часов.

3. С целью получения зависимости скорости продольного деформирования каменной соли от осевого напряжения методом ступенчатого нагружения с погрешностью 15 процентов от зависимости полученной в ходе экспериментов проводимых прямым методом необходимо не менее 6 ступеней нагружения.

4. По результатам проведенных экспериментов в режиме ступенчатого нагружения предложена математическая модель описания и прогноза длительного деформирования каменной соли.

Глава 3. Трехосные испытания

Обработка экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний в режиме одноосного ступенчатого нагружения, позволила установить необходимые параметры проведения экспериментов. В дальнейшем установленные параметры видится логичным проверить для экспериментов в режиме трёхосного сжатия. Описание проводимых испытаний в ходе исследования приведены в работах [79-80].

Исследования в условиях трехосного сжатия производились многочисленными испытаниями для вида напряженного состояния обобщенного сжатия $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ (схема Т. Кармана).

Исследование реологических характеристик производилось по результатам испытаний как в режиме ступенчатого нагружения так и в режиме испытаний, проведенных прямым методом. Ниже описаны методики проведения экспериментов по определению реологических характеристик в режиме ступенчатого нагружения.

3.1 Описание оборудования для проведения экспериментов

Все эксперименты, проводимые в режиме сложнонапряженного состояния, требуют от оборудования осуществление одновременную регистрацию осевой и боковой нагрузки, продольных и поперечных деформаций образца изменяющихся в процессе проведения испытания. Это позволяет получить корректные данные из поставленных экспериментов и позволяют производить анализ полученных результатов.

Установки для проведения испытаний каменной соли в режиме длительного нагружения должны отвечать следующим требованиям:

- постоянное во времени поддержание осевого и бокового напряжения на образец каменной соли;
- позволять в ходе эксперимента замерять продольные ε_1 и поперечные ε_3 деформации образца;
- создание напряжений, достаточных для разрушения образца;

- возможность достижения продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций образца не менее 20%.

Данным требованиям соответствует применяемая установка БУ-61 для проведения испытаний горных пород в трехосном напряженном состоянии. Все эксперименты в данном режиме нагружения были произведены на установке БУ-61. Данная установка разработана в ООО «Подземгазпром» (в настоящее время ООО «Газпром геотехнологии») совместно с ВНИМИ. Установка применяется в испытательном лабораторном центре ООО «Газпром геотехнологии». Данная установка позволяет испытывать цилиндрические образцы горной породы высотой от 70 до 80 мм и диаметром от 35 до 40 мм. При этом высота образца h должна быть в 2 раза больше его диаметра d . Данное соотношение высоты к диаметру образца так же рекомендует ГОСТ 21153.2-84 [60].

Главные напряжения σ_1 , σ_2 , σ_3 создаются гидростатическим давлением. Источником давления в рабочей камере служит рабочая жидкость (компрессорное масло) нагнетаемое насосом. Максимально возможное значение напряжений σ_{max} в любом направлении достигает 100 МПа.

Установка БУ-61 состоит из шести камер трехосного сжатия. Каждая камера установки подключена к своему гидростатическому стенду, что позволяет создавать на каждой камере свое напряжение. Гидростатические стенды подключены к гидравлической насосной станции ГНС 12-0,8.

Принципиальная схема камеры объемного сжатия установки БУ-61 предоставлена на рисунке 3.1.

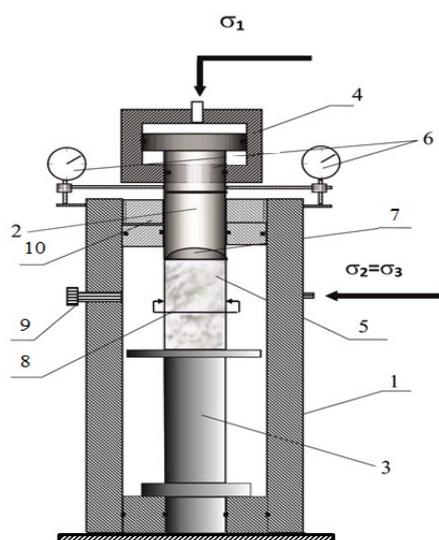


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема камеры объемного сжатия БУ61: 1 – герметичный корпус камеры; 2 – подвижный шток; 3 – неподвижный шток; 4 – камера создания осевого давления; 5 – образец; 6 – манометры; 7 – шарнирная втулка (подпятник); 8 – кольцевой датчик поперечных деформаций (экстензометр); 9 - вентиль сброса бокового давления; 10 – крышка

Камера БУ-61 предоставляет собой цилиндрический корпус, у которого сверху расположен подвижный шток (2). Диаметр штока составляет 36 мм. Диаметр штока близок к диаметру испытываемого образца для исключения влияния всестороннего давления обжатия на осевое напряжение σ_1 . Общий вид установок для проведения испытаний представлен на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 - Общий вид установок трехосного сжатия БУ -61

По торцам образца устанавливаются металлические плашки. Образец вместе с плашками изолируется от рабочей жидкости, передающей гидростатическое давление в камере объемного сжатия. Для этого на образец наносят гидроизоляционный материал и помещают в отрезок трубчатой резины. Резина должна перекрывать контактирующие с торцами образца части плашек. Изолированный образец устанавливают в рабочую полость камеры объемного сжатия в сборе с плашками между опорными торцами нагрузочных элементов камеры. На боковой поверхности приклеиваются диаметрально противоположно два крепления для датчика радиальных деформаций. Фото подготовленных образцов к испытанию представлено на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Подготовленные образцы для проведения испытаний. 1 – металлические плашки; 2 – герметичная оболочка

Образец помещается в камеру, осевое давление на образец осуществляется с помощью насосной станции ГНС 12-0,8, поддержание давления происходит с помощью рессивера с необходимым давлением.

Боковое давление $\sigma_2 = \sigma_3$ нагнетается с помощью рабочей жидкости (компрессорное масло). Максимально допустимое давление в камере составляет 150 МПа. Нагнетание давления маслом производится так же насосной станцией ГНС 12-0,8. Расчет осевого напряжения σ_1 производится по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{40 \cdot P}{\pi \cdot d_0^2} - \sigma_3 \cdot \left(\frac{d_{st}^2}{d_0^2} - 1 \right), \text{ МПа} \quad (3.1)$$

где: P - осевая нагрузка создаваемая рессивером, кН;

σ_3 - боковое давление, МПа;

d_0 - диаметр образца, см;

d_{st} - диаметр штока, см.

Измерение продольных деформаций ε_1 производится при помощи 2-х датчиков. Один из которых представляет собой четыре тензометрических датчика, закрепленных на на металлических пластинках, спаянные в мостовую схему. Металлические пластинки крепятся к сонованию, которое в свою очередь закреплены на индикаторе часового типа ИЧ-50. База применяемых тензометрических датчиков 20 мм. Точность измерения составляет 0,002 мм. Фото датчика представлено на рисунке 3.4.

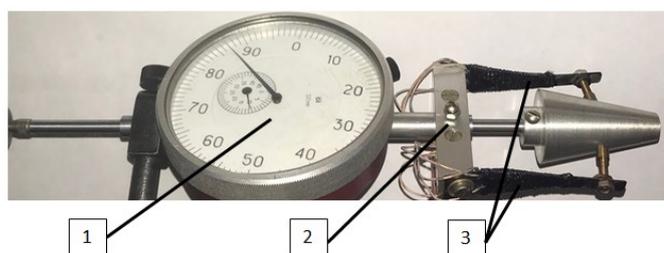


Рисунок 3.4 – Датчик продольных деформаций. 1 – индикатор часового типа ИЧ – 50; 2 – основание металлических пластин; 3 – спаянные в мостовую схему тензометрические датчики

Второй датчик представляет собой описанный ранее датчик линейных перемещений с потенциометром GEFRAN.

Базовыми точками для определения продольных деофрмаций являются корпус камеры и шток. Расчет производится как полусумма между датчиками ИЧ – 50 и датчиком GEFRAN.

Измерение поперечных деофрмаций ε_3 производится четырьмя тензометрическими датчиками спаянными в мостовую схему и наклееными на металлическое кольцо. Металлическое кольцо устанавливается двумя заостренными стержнями к специальным плашкам диаметрально противоположно приклееным на бокой поверхности образца. База

применяемых тензометрических датчиков 20 мм. Точность измерения составляет 0,002 мм. Фото датчика представлено на рисунке 3.5.

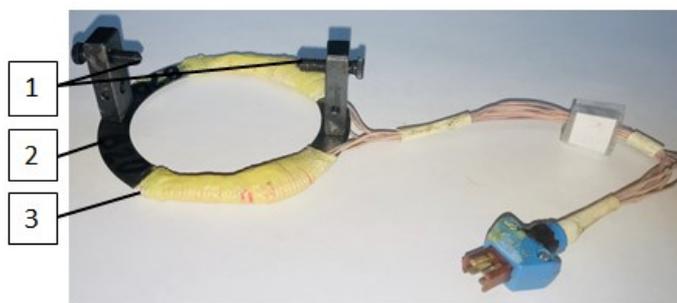


Рисунок 3.5 – Датчик измерения поперечных деформаций. 1 – точки крепления датчика к образцу; 2 – металлическое кольцо; 3 – приклеенные и собранные в полумостовую схему тензометрические датчики

Датчик подключается к программному комплексу автоматизации экспериментальных и технологических установок АСТест.

Перед подключением датчиков продольных и поперечных деформаций производилась тарировка. Тарировочные данные представлены на рисунке 3.6.

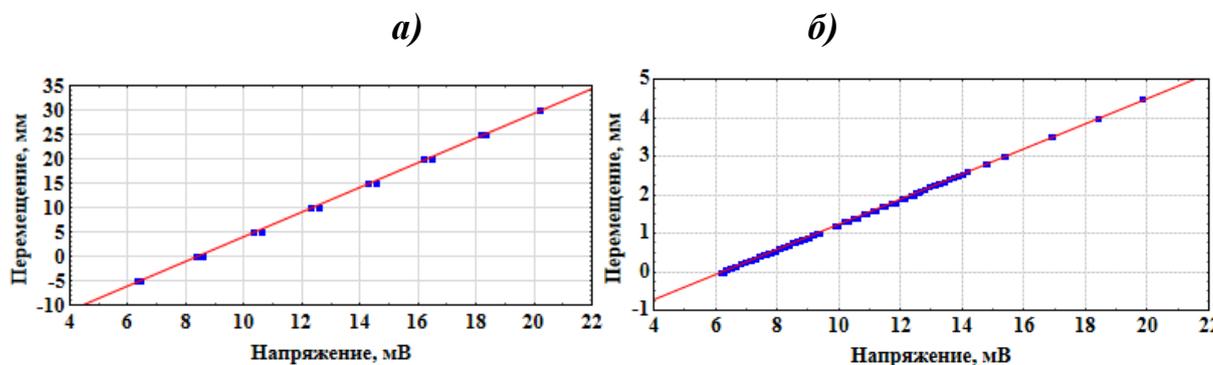


Рисунок 3.6 – Данные тарировки продольных и поперечных деформаций. *а)* – данные датчика продольных деформаций; *б)* – данные датчика поперечных деформаций

Датчики продольных и поперечных деформаций подключаются к программному комплексу автоматизации экспериментальных и технологических установок АСТест.

Комплекс совмещен с персональным компьютером, оснащенном средством сбора данных. Возможности АСТест по составу, количеству и

характеристикам каналов зависят от устройств сбора данных и производительности самого компьютера. Комплекс позволяет проводить настройку сценариев эксперимента, осуществлять хранение и поиск нужного сценария в базе данных, проводить сквозную калибровку измерительных каналов, проводить измерения в реальном масштабе времени с одновременной архивацией и визуализацией экспериментальных данных, просматривать и анализировать результаты. В реальном масштабе времени производится первичная математическая обработка и допусковый контроль значений измеряемых параметров. Вся информация сохраняется в формате базы данных и доступна для последующей обработки и сравнительного анализа. Также программное обеспечение позволяет настроить и контролировать выдачу сигналов с ЦАП. В АСТest предусмотрена возможность организации распределенной системы измерений, данные в которой передаются по сети Ethernet со сборщика(ов) на сервер(ы). В состав комплекса входит программное обеспечение вторичной обработки и визуализации результатов измерений. Программное обеспечение комплекса выполнено по модульному принципу (рисунок 3.7):

1. Модуль подготовки и проведения эксперимента АСТest©-Composer – создание, изменение, поиск, хранение и запуск сценариев экспериментов.

2. Подпрограмма сквозной тарировки и информационного сопровождения измерительных каналов включена в модуль АСТest©-Composer. Она передает информацию другим подпрограммам комплекса о составе и характеристиках имеющихся измерительных каналов и об их элементах, позволяет формировать измерительные каналы и определять их метрологические характеристики.

3. Программное обеспечение реального времени состоит из двух независимых частей: АСТest©-Registrar – подсистема сбора и регистрации в реальном времени, включающая программы первичной обработки; АСТest©-Visualizer – средства визуализации.

4. Модуль послесеансной обработки данных ACTest©-Analyzer – обработка и анализ результатов, включающий программы математической обработки, межмаркерные измерения, различные варианты экспорта и импорта данных.

5. Математическая библиотека ACMath – функции математической обработки, как в реальном времени, так и в послесеансе. В состав комплекса также входят модули, сетевой обмен, сквозную калибровку измерительных каналов, архивацию, проигрывание, экспорт/импорт данных.



Рисунок 3.7 - Структура программного обеспечения комплекса ACTest

Порядок нагружения образца и проведения эксперимента в режиме длительного нагружения в камере БУ-61 следующий.

С помощью насосной станции производится закачка масла в камеру до создания давления 1 МПа, с условием $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. После чего производится выдержка в течении 1 часа для устранения паразитарных деформаций. Далее производится закачка масла до минимального главного напряжения испытания. После производится выдержка напряжения в

течении суток в режиме гидростатического нагружения. В процессе гидростатического нагружения система стабилизируется. Далее плавно увеличивается максимальное главное напряжение со скоростью 1-2 МПа/с до необходимого заданного значения на ползучесть. После окончания опыта образцы извлекаются и проверяются на предмет пробоя резиновой оболочки проникновения масла. Если масло попадало под оболочку, то данные считаются недействительными и обработка результатов не производится. Пример образцов после эксперимента представлен на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Фотографии образцов после эксперимента на ползучесть. *а)* – без пробоя оболочки; *б)* – с пробоем оболочки

3.2 Методика проведения испытаний в режиме длительно нагружения прямым методом

С целью исследования реологических характеристик каменной соли производились эксперименты в режиме длительного нагружения для различных сумм главных напряжений σ_v . Результатом проведения

реологических характеристик должны быть кривые ползучести каменной соли. Под кривыми ползучести понимается изменение деформаций (продольных и поперечных) во времени при постоянном напряжении. Для анализа данных, полученных в ходе экспериментов был выбран степенной закон ползучести:

$$\dot{\varepsilon}_i = A \cdot (\sigma_i)^n \cdot t^m \quad (3.2)$$

В данном уравнении σ_i является интенсивностью напряжений. За интенсивность напряжений принимают величину, пропорциональную квадратному корню из второго инварианта девиатора напряжений $I_2(D_H)$.

Второй инвариант тензора напряжений вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} I_2(D_H) &= s_x \cdot s_y + s_y \cdot s_z + s_z \cdot s_x - s_{xy}^2 - s_{yz}^2 - s_{xz}^2 = \\ &= \frac{1}{6} \left((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2) \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Интенсивность напряжений записывается в виде [59]:

$$\sigma_i = \sqrt{3 \cdot I_2(D_H)} \quad (3.4)$$

Подставляем выражение 3.3 в выражение 3.4, получаем уравнение для расчёта интенсивности напряжений:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2)} \quad (3.5)$$

В сокращенном виде зависимость интенсивности напряжений от главных напряжений, входящая в уравнение степенного закона ползучести 3.2 определяется:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3.6)$$

где σ_1 – осевое напряжение, МПа;

$\sigma_2 = \sigma_3$ – боковое напряжение, МПа.

Под $\dot{\varepsilon}_i$ понимается интенсивность деформаций, представляет собой величину, пропорциональную квадратному корню из второго инварианта девиатора деформаций. Опуская вывод уравнений интенсивности линейных и угловых деформаций, по аналогии с интенсивностью главных напряжений уравнение расчёта интенсивности деформаций от главных линейных деформаций:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (3.7)$$

Параметр A , входящий в уравнение (3.2), характеризует способность горных пород сопротивляться действующим напряжениям и имеет размерность $\frac{1}{\text{МПа}^n \cdot \text{сут}^{1+m}}$. За влияние уровня напряженного состояния на скорость деформирования отвечает параметр $n > 1$. $-1 < m \leq 0$ – параметр, учитывающий замедление скорости ползучести во времени. Стоит отметить, что параметр n определяется для различных значений σ_i на стадиях установившейся ползучести. Под стадией установившейся ползучести понимается стадия, на которой скорость деформирования близка к постоянной. Набор значений σ_i и ε_i описывается функцией

$$\dot{\varepsilon}_i = B \cdot (\sigma_i)^n \quad (3.8)$$

Из описываемой функции определяется параметр n .

Как видно из порядка описания процесса длительного деформирования каменной соли степенным законом ползучести, необходимо определять зависимость уравнения из (3.8). Данную зависимость возможно получить испытывая образцы как в режиме прямого длительного нагружения так и в режиме ступенчатого нагружения. Необходимо обосновать параметры для испытаний в режиме ступенчатого нагружения, при которых зависимость (3.8) буде совпадать с результатами полученными в режиме испытаний прямым методом. В связи с этим были проведены эксперименты прямым методом в режиме трехосного нагружения.

С целью проведения экспериментов в режиме длительного нагружения прямым методом, отбирались образцы каменной соли с разных глубин. Напряжения, при которых проводились эксперименты, подбирались исходя из суммы главных напряжений.

Определение σ_v производилось по методике предложенной Гальпериным А.М. и Шафаренко Е.М. в работе [62]:

$$\sigma_v = 2,5 \cdot \rho \cdot g \cdot h, \text{ Па} \quad (3.9)$$

где ρ – средняя плотность вышележащих горных пород, кг/м³;

h - глубина отбора кернового материала, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

В рамках проведения серии экспериментов одной группы образцов, сумма главных напряжений σ_v оставалась постоянной и рассчитывалась по формуле [31]:

$$\sigma_v = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3.10)$$

где σ_1 – осевое напряжение, Па;

$\sigma_2 = \sigma_3$ – боковое напряжение, Па.

3.3 Анализ результатов проведения экспериментов в режиме длительного нагружения прямым методом и методом

Как показано в пункте 1.7.1 прямой метод проведения эксперимента подразумевает под собой проведение испытания под постоянной действующей нагрузкой на протяжении длительного времени. Для обоснования параметров проведения экспериментов в режиме ступенчатого нагружения, проводились эксперименты прямым методом при различном соотношении осевого σ_1 и бокового $\sigma_2 = \sigma_3$ напряжения. При этом сумма главных напряжений σ_v оставалась постоянной. В таблице 3.1 представлены

напряженные состояния, при которых были проведены эксперименты прямым методом.

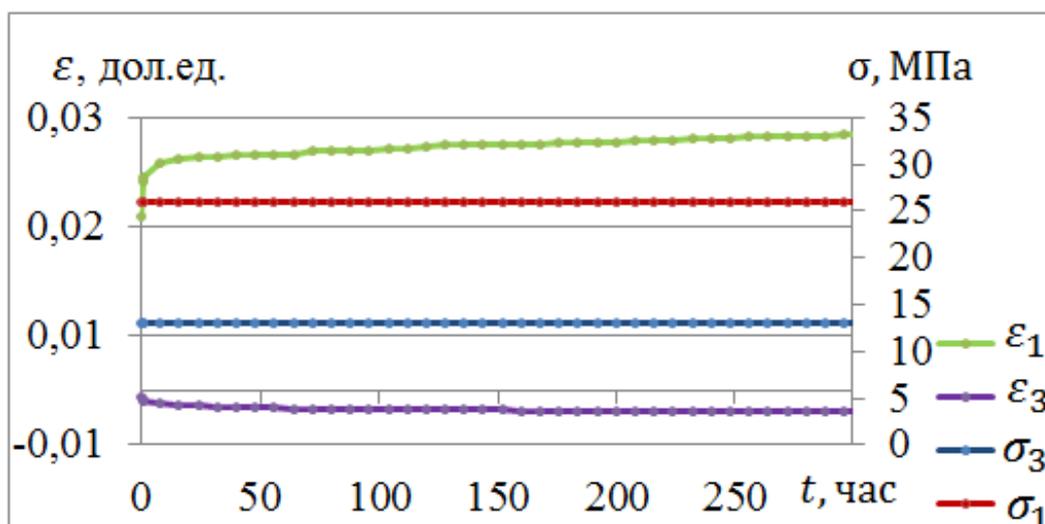
Таблица 3.1 – Напряженные состояния, воспроизведенные в экспериментах

Сумма главных напряжений σ_v , МПа	Осевое напряжение σ_1 , МПа	Боковое напряжение $\sigma_2 = \sigma_3$, МПа	Разность напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$, МПа
54	30	12	18
	34	10	24
	38	8	30

Отметим, что указанные в таблице значения суммы главных напряжений σ_v рассчитывались по формуле 3.9. Осевое σ_1 и боковое напряжение $\sigma_2 = \sigma_3$ подбирались исходя из возможности испытательных установок с условием формулы 3.10. Важнейшим критерием при проведении экспериментов являлся подбор образцов с близкими текстурными и структурными особенностями. Данные, полученные в ходе испытаний при одном и том же напряженном состоянии, усреднялись, и по ним строилась кривая длительного деформирования каменной соли.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов, был получен набор кривых для различного вида напряженного состояния. На рисунке 3.9 представлен набор кривых для серии экспериментов при сумме главных напряжений $\sigma_v = 54$ МПа.

a)



б)

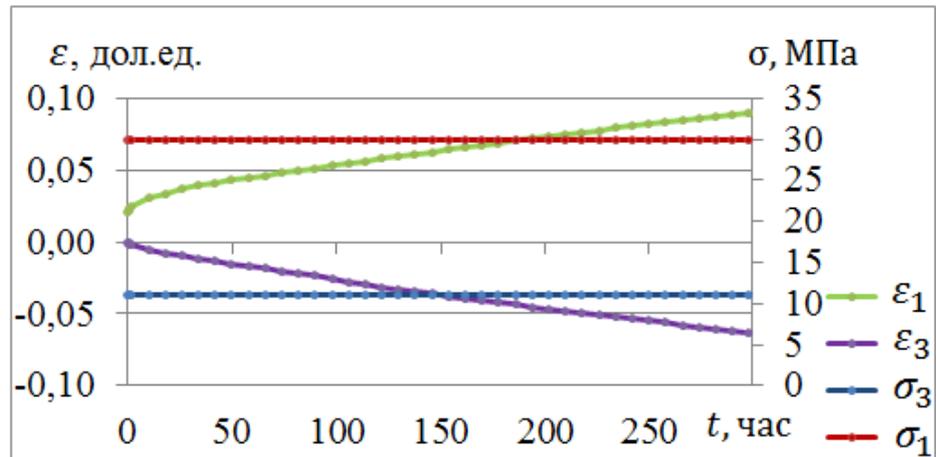


Рисунок 3.9 – Графики зависимостей относительных продольных ε_1 и поперечных деформаций ε_3 , главных напряжений σ_1 и σ_3 от времени t . Разность главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_3 = 12$ МПа (а) и $\sigma_1 - \sigma_3 = 19$ МПа (б)

Таким образом, в ходе проведения экспериментов прямым методом в режиме трехосного нагружения были получены семейства кривых длительного деформирования каменной соли. Данные кривые представлены на графике 3.10.

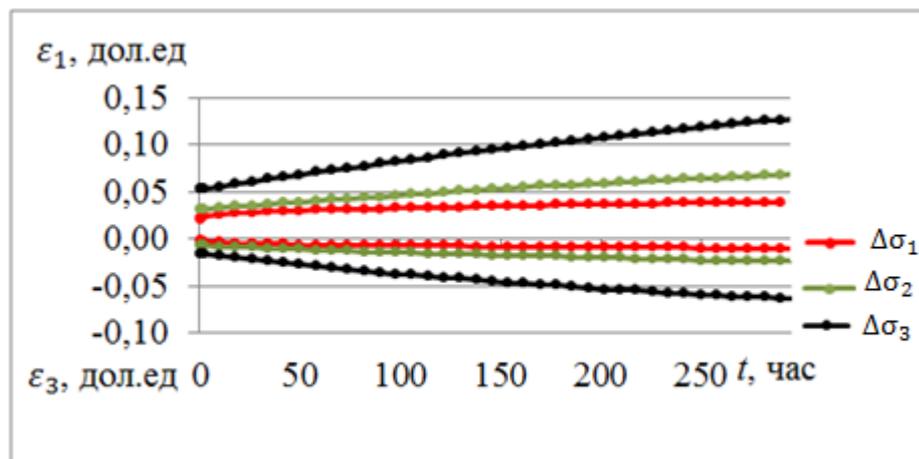


Рисунок 3.10 – Графики зависимостей относительных продольных ε_1 и поперечных деформаций ε_3 от времени t при разности главных напряжений 18 МПа (σ_1), 24 МПа (σ_2) и 30 МПа (σ_3)

Стоит отметить, что для получения зависимостей относительных деформаций от времени при проведении испытаний прямым методом

является очень долгим процессом и требует большого количества установок. Кроме того, стоит учитывать тот факт, что каждая кривая длительного деформирования получена по усредненным данным нескольких экспериментов. Это было сделано для того, чтобы повысить точность определяемых величин. Отдельно следует отметить, что при наличии групп каменной соли с различными структурными и текстурными особенностями, необходимо проводить данные эксперименты для каждой группы. В связи с вышесказанным, эксперименты были проведены при трех разностях главных напряжений.

Дальнейший анализ был направлен на получение параметров уравнения 3.2. В связи с этим рассчитаны интенсивности напряжений σ_i и интенсивность деформаций ε_i по уравнениям 3.6 и 3.7. На расчетных кривых интенсивности деформаций выделялись участки, приближенные к прямолинейным. Скорость интенсивности деформирования на прямолинейных участках кривой постоянная. В связи с этим, к выделенным участкам проводились касательные прямые. Скорость интенсивности деформаций определялась как тангенс угла наклона проведенной касательной.

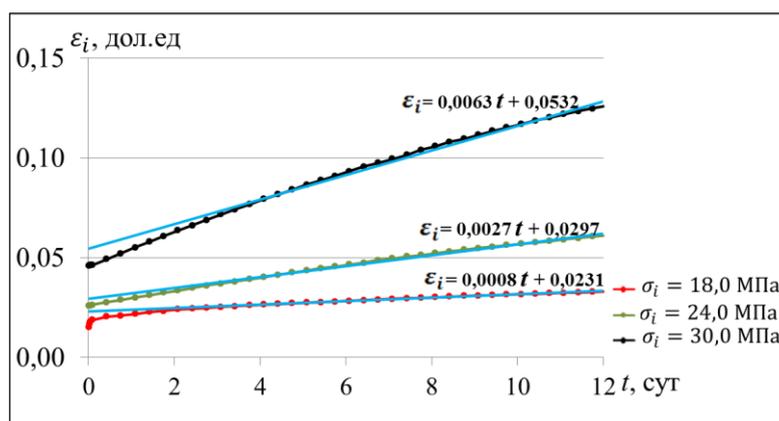


Рисунок 3.11 – Графики зависимостей интенсивности деформирования ε_i при различных значениях интенсивности напряжений σ_i времени t

Таким образом, определенные параметры, необходимые для дальнейшего расчёта приведены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Данные расчёта интенсивности напряжений σ_i , интенсивность деформаций ε_i и скорости интенсивности деформаций $\dot{\varepsilon}_i$

$\sigma_1=30$ МПа, $\sigma_3=12$ МПа			$\sigma_1=34$ МПа, $\sigma_3=10$ МПа			$\sigma_1=38$ МПа, $\sigma_3=8$ МПа		
σ_i , МПа	ε_i , дол. ед.	$\dot{\varepsilon}_i$, дол.ед/сут	σ_i , МПа	ε_i , дол. ед.	$\dot{\varepsilon}_i$, дол.ед/сут	σ_i , МПа	ε_i , дол. ед.	$\dot{\varepsilon}_i$, дол.ед/сут
18,0	0,0151	0,0008	24,0	0,0261	0,0027	30,0	0,0459	0,0063
	0,0188			0,0264			0,0463	
	0,0219			0,0300			0,0552	
	0,0241			0,0335			0,0638	
	0,0254			0,0371			0,0717	
	0,0265			0,0402			0,0794	
	0,0276			0,0436			0,0866	
	0,0284			0,0466			0,0933	
	0,0294			0,0497			0,0995	
	0,0302			0,0523			0,1058	
	0,0310			0,0548			0,1115	
	0,0317			0,0569			0,1169	
	0,0324			0,0592			0,1219	
	0,0333			0,0626			0,1292	

По данным проведённых расчётов строился график зависимости σ_i от $\dot{\varepsilon}_i$ и производилось описание уравнением 3.8.

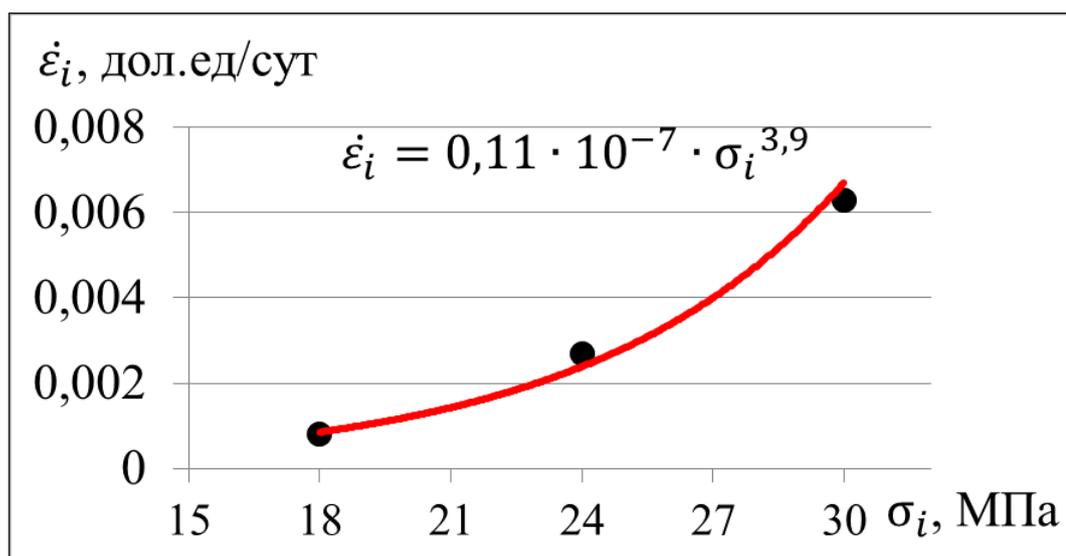


Рисунок 3.12 – Графики зависимостей скорости интенсивности деформирования $\dot{\varepsilon}_i$ от интенсивности напряжений σ_i

Таким образом были определены параметры, входящие в уравнение 3.8.

$$\dot{\varepsilon}_i = B \cdot (\sigma_i)^n = 0,11 \cdot (\sigma_i)^{3,9} \quad (3.11)$$

Степенной закон длительного деформирования 3.2 в общем виде учитывает скорость интенсивности деформирования $\dot{\varepsilon}_i$. В связи с необходимостью аппроксимации экспериментальных кривых длительного деформирования, уравнение 3.2 нужно интегрировать по времени.

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = \int_0^t A \cdot (\sigma_i)^n \cdot t^m \cdot dt \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_i = A \cdot (\sigma_i)^n \int_0^t t^m \cdot dt \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_i = A \cdot (\sigma_i)^n \cdot \frac{t^{m+1}}{m+1} \quad (3.14)$$

С целью описания процесса длительного деформирования степенным законом, аппроксимируем экспериментальные зависимости интенсивности деформаций от времени уравнением 3.14. Для каждого напряжения определим коэффициенты A и n .

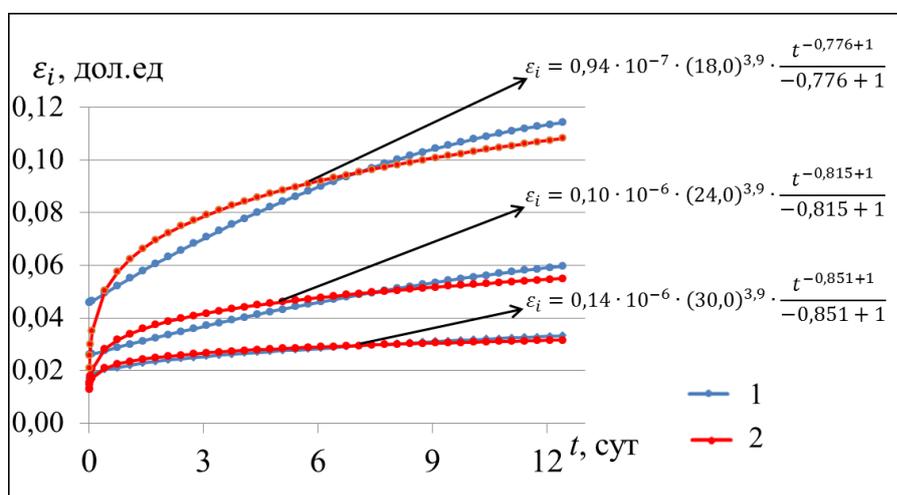


Рисунок 3.13 – Графики зависимостей интенсивности деформаций ε_i от времени t экспериментальных (1) и аппроксимированных данных (2) по уравнению 3.14

В результате аппроксимации экспериментальных данных зависимости интенсивности деформаций ε_i от времени t уравнением 3.14 был получен ряд

значений параметров A и m при различных величинах интенсивности напряжения σ_i . Для дальнейшего расчёта определялись средние значения по формулам:

$$A = \frac{\sum_1^N A_j}{N}; \quad (3.15)$$

$$m = \frac{\sum_1^N m_j}{N} \quad (3.16)$$

Расчётные значения указанных параметров при соответствующих σ_i приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Результаты расчётных параметров

σ_i , МПа	A	Среднее A	m	Среднее m
18,0	$0,94 \cdot 10^{-7}$	0,11 · 10 ⁻⁶	-0,776	-0,814
24,0	$0,10 \cdot 10^{-6}$		-0,815	
30,0	$0,14 \cdot 10^{-6}$		-0,851	

В ходе расчётных данных были определены все параметры степенного закона (уравнение 3.2) длительного деформирования каменной соли. По полученным данным были построены графики экспериментальных и кривых рассчитанных по уравнению 3.2

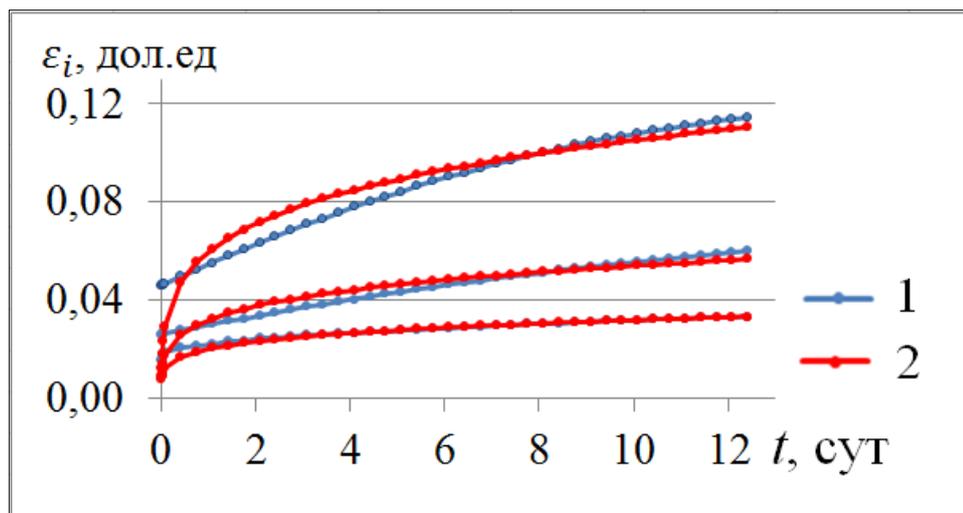


Рисунок 3.14 – Графики зависимостей интенсивности деформаций ε_i от времени t экспериментальных данных (1) и расчётных (2) по уравнению 3.2

Как видно из рисунка 3.14, параметры ползучести, полученные в ходе испытания прямым методом в режиме трехосного сжатия, позволяют достоверно описать процесс длительного деформирования степенным законом ползучести. Дальнейшие исследования направлены на изучение процесса длительного деформирования в режиме испытаний методом ступенчатого нагружения и сопоставление данных.

3.3 Описание параметров ступенчатого нагружения

Рассматриваемый ниже метод направлен на оптимизацию испытаний каменной соли по определению реологических характеристик. Алгоритм обоснования необходимых параметров испытания методом ступенчатого нагружения в режиме трехосного сжатия предполагает: проведение экспериментов с суммой главных напряжений σ_v , при которой проводились эксперименты прямым методом; расчёт параметров степенного закона ползучести и описание длительного деформирования результатов экспериментов с разной величиной выдержки времени на ступени нагружения; сравнение параметров степенного закона ползучести, рассчитанных по результатам проведенных экспериментов прямым методом и методом ступенчатого нагружения.

Как видно из таблицы 3.1. сумма главных напряжений σ_v для проведения экспериментов рассчитана по формуле 3.23 и составляет 54 МПа. В связи с этим перед началом проведения эксперимента создавалось всесторонне напряжение $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 18$ МПа, что удовлетворяет условию уравнения 3.19 при $\sigma_v = 54$ МПа. После этого плавно создавалось осевое напряжение $\sigma_1 = 24,0$ МПа и боковое $\sigma_3 = 15,0$ МПа. При этих условиях разница осевого и бокового напряжения составила: $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = 9$ МПа., МПа

В дальнейшем величина осевого и бокового напряжения задавалась таким образом, чтобы их разница увеличивалась на 3 МПа. Схема создания напряжения во время эксперимента представлена на рисунке 3.15.

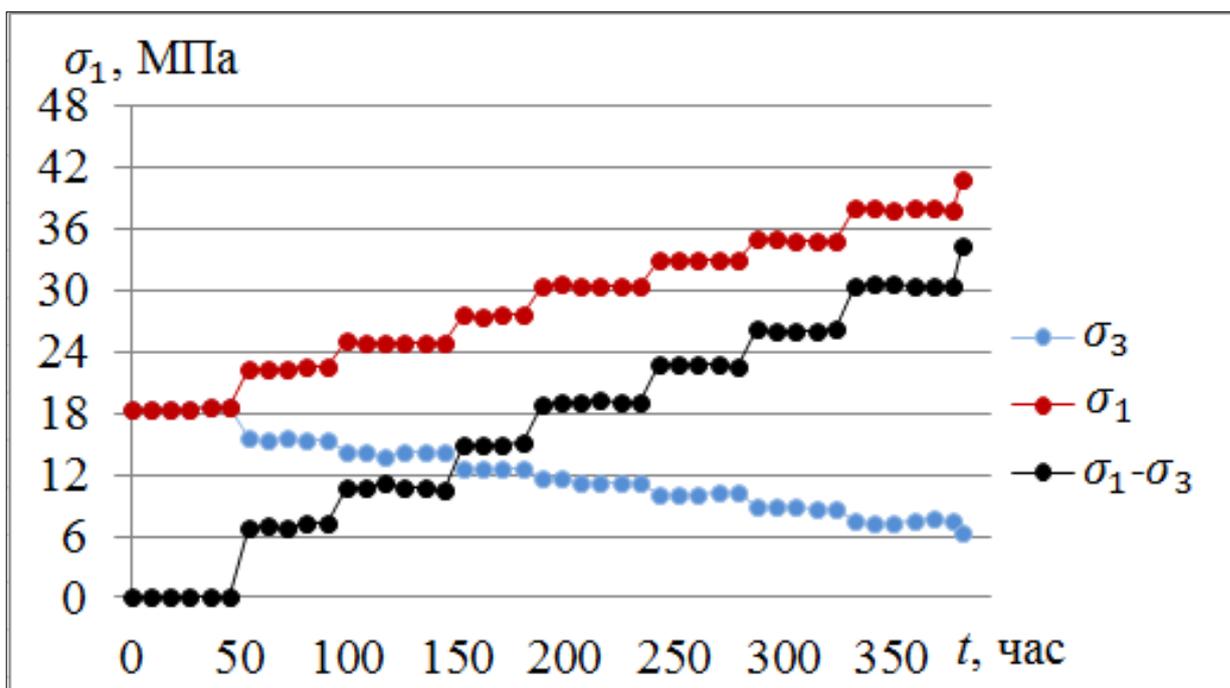


Рисунок 3.15 – Схема нагружения образца каменной соли при испытаниях методом ступенчатого нагружения

В таблице 3.4 представлены величины напряжений, при которых проводились эксперименты методом ступенчатого нагружения.

Таблица 3.4 – Величины напряжений, при которых проводились эксперименты методом ступенчатого нагружения

σ_v , МПа	σ_1 , МПа	$\sigma_2 = \sigma_3$, МПа	$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$, МПа	$\Delta\sigma_n - \Delta\sigma_{n-1}$, МПа
54	18	18	0	12
	24	15	9	3
	26	14	12	
	28	13	15	
	30	12	18	
	32	11	21	
	34	10	24	
	36	9	27	
	38	8	30	
	40	7	33	
	42	6	36	

Как видно из таблицы 3.4 на первой ступени нагружения разница между осевым и боковым напряжением составляла 9 МПа. В дальнейшем на каждой ступени нагружения она увеличивалась на 3 МПа. Это обусловлено тем, что при незначительной разнице процесс деформирования протекает медленно, что показано в пункте 2.3.1. В процессе дальнейшего испытания, разница осевого и бокового напряжения увеличивалась на 3 МПа. Это необходимо для дальнейшего получения не менее 6 ступеней нагружения, что обосновано в пункте 2.3.1. В процессе ступенчатого нагружения напряжения для всей серии экспериментов напряжения соответствовали таблице 3.4. В качестве изменяемого параметра выступало время t выдержки напряжения на каждой ступени нагружения. Для различной серии экспериментов оно изменялось, с целью нахождения величины, при которых параметры степенного закона ползучести схожи с параметрами, полученными в режиме испытаний прямым методом. Величины времени выдержки на ступенях представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Величины времени выдержки постоянного напряжения на ступенях нагружения

Время выдержки на каждой ступени нагружения t , час	24	48	72	96	168
---	----	----	----	----	-----

3.4 Анализ результатов проведения экспериментов в режиме длительного нагружения методом ступенчатого нагружения

С целью получения экспериментальной зависимости продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени t проводилась серия экспериментов и по результатам проведенных экспериментов значения усреднялись. На рисунке 3.16 представлены данные зависимости при одинаковых условиях нагружения и времени выдержки на ступени t равному 24 часам.

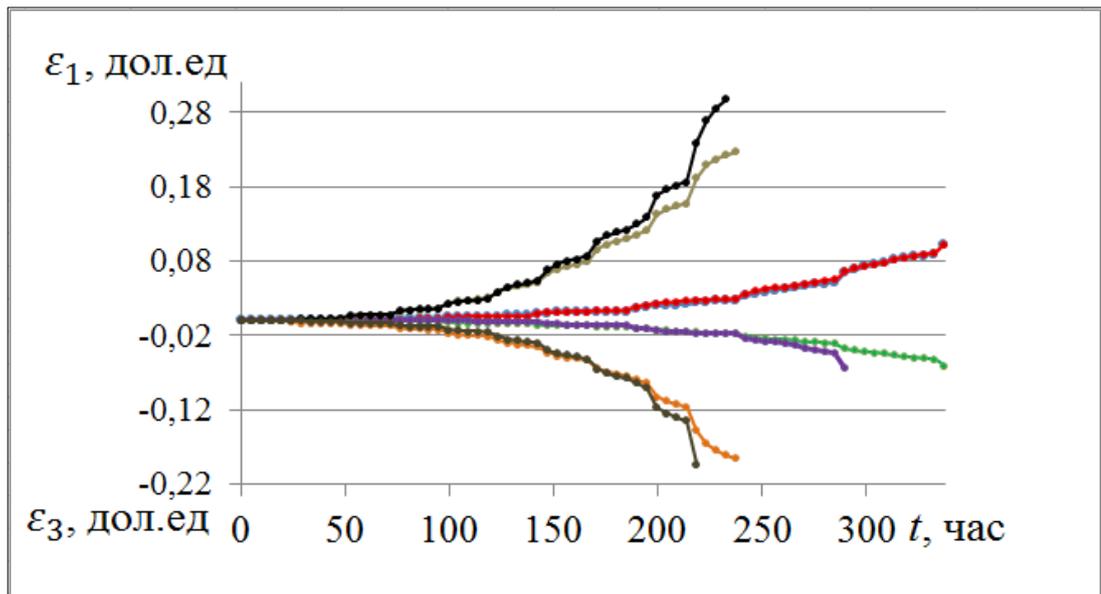
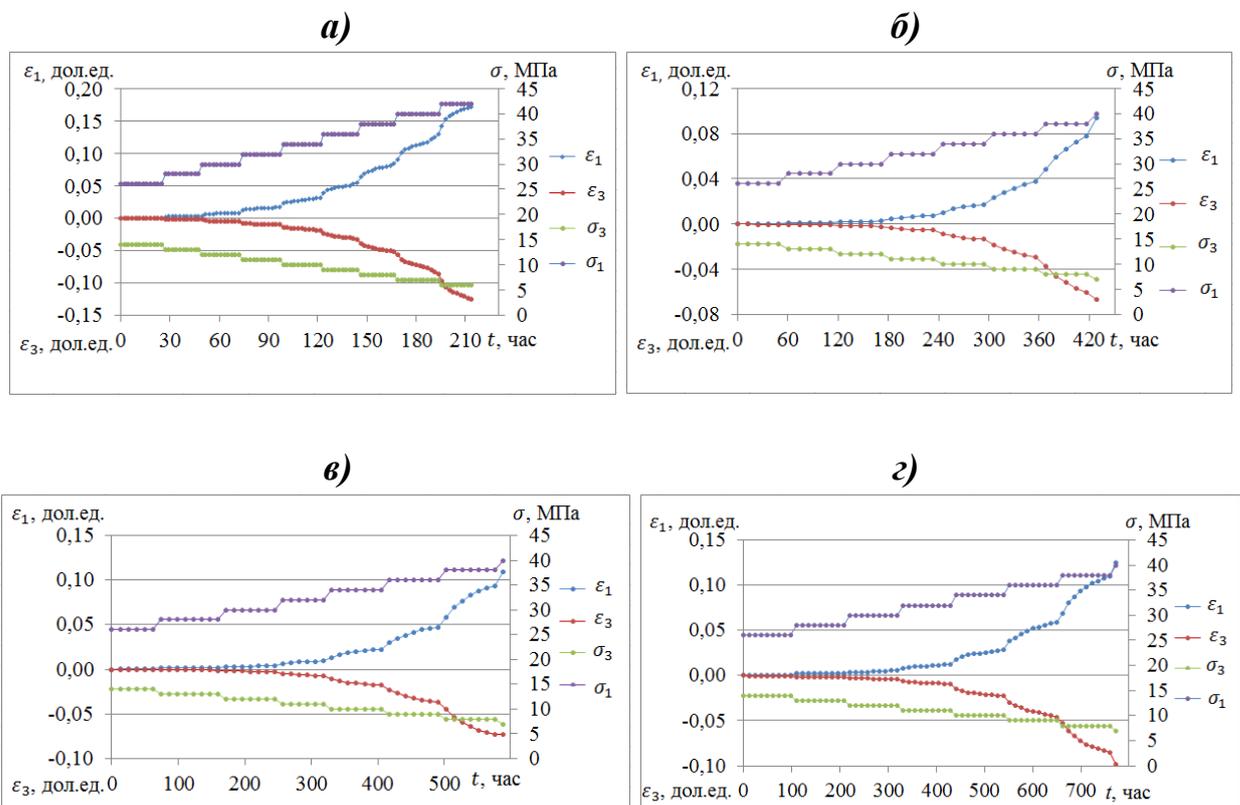


Рисунок 3.16 – Графики зависимости продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени t . Время выдержки на ступени составляло 24 часа и 48 часов.

Ниже приведены графические зависимости усредненных экспериментальных значений для экспериментов с разным временем выдержки на ступени.



д)

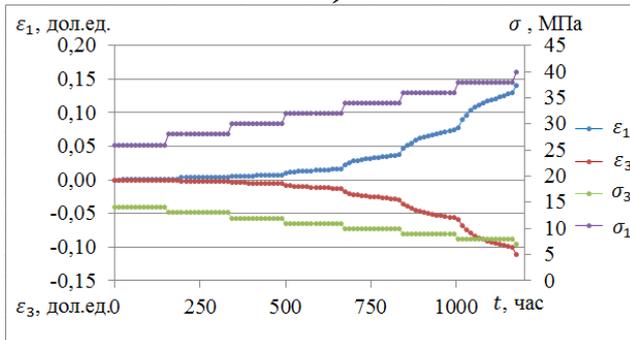


Рисунок 3.17 – Графики зависимости продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени t по усредненным значениям. а) – время выдержки на ступени 1 сутки; б) – 2 суток; в) – 3 суток; г) – 4 суток; д) – 7 суток.

Из рис 3.17 видно, что разрушение образцов происходило при одном и том же напряженном состоянии, но величина конечных деформаций была различна. Для наглядности приведем графические зависимости на одном рисунке. Таким образом, учитывая одинаковый масштаб на рисунке, появится возможность оценить изменение конечных деформаций разрушения в зависимости от времени выдержки на ступени.

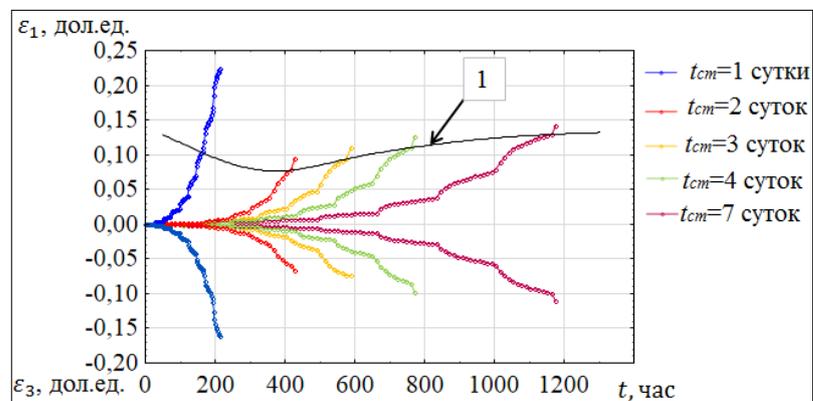


Рисунок 3.18– Графики зависимости продольных ε_1 и поперечных ε_3 деформаций от времени t по усредненным значениям проведенных экспериментов. t_{cm} – время выдержки на ступени. 1 – линия соединяющая величины деформаций при одинаковом напряжении $\sigma_1 = 36$ МПа, $\sigma_3 = 9$ МПа.

Качественный анализ графика показывает, что на линии 1, соединяющая величины деформаций при одних и тех же напряжениях для

разных экспериментов, можно выделить 3 участка. В экспериментах, с временем выдержки менее 2 суток на ступени, линия имеет ниспадающий характер. Новая ступень нагрузки вызывает быстрый рост деформаций и чем меньше время выдержки на ступени, тем больше величина деформаций. При увеличении времени ступени свыше 2 суток, соединяющая кривая 1 на рисунке 3.18 выполаживается. В связи с этим, на данном участке деформации, при которых происходит разрушение образца, имеют количественно меньшие значения, чем на предыдущем участке. На рисунке 3.18 видно, что на каждой ступени накапливаются деформации. В конечном итоге, при увеличении времени выдержки на ступени, деформации растут за счёт ранее накопленных деформаций на предыдущих ступенях деформирования.

В качестве более перспективного метода оценки результатов было выбрано сравнение параметров степенного закона ползучести (уравнение 3.2), полученных прямым методом и методом ступенчатого нагружения. По уравнению 3.6 были рассчитаны зависимости интенсивности напряжений от главных напряжений. Очевидно, что для всех экспериментов, проведенных методом ступенчатого нагружения интенсивности напряжений будут одинаковыми, в связи с тем что от эксперимента к эксперименту изменялось время выдержки на ступени, а величины напряжений на каждой ступени были неизменны. Рассчитанные интенсивности напряжений представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Величины главных напряжений и интенсивности напряжений

σ_1 , МПа	$\sigma_2 = \sigma_3$, МПа	σ_i , МПа
26	14	12
28	13	15
30	12	18
32	11	21
34	10	24
36	9	27
38	8	30
40	7	33
42	6	36

Далее по уравнению 3.7 были рассчитаны значения интенсивности деформаций в ходе экспериментов при ступенчатом нагружении.

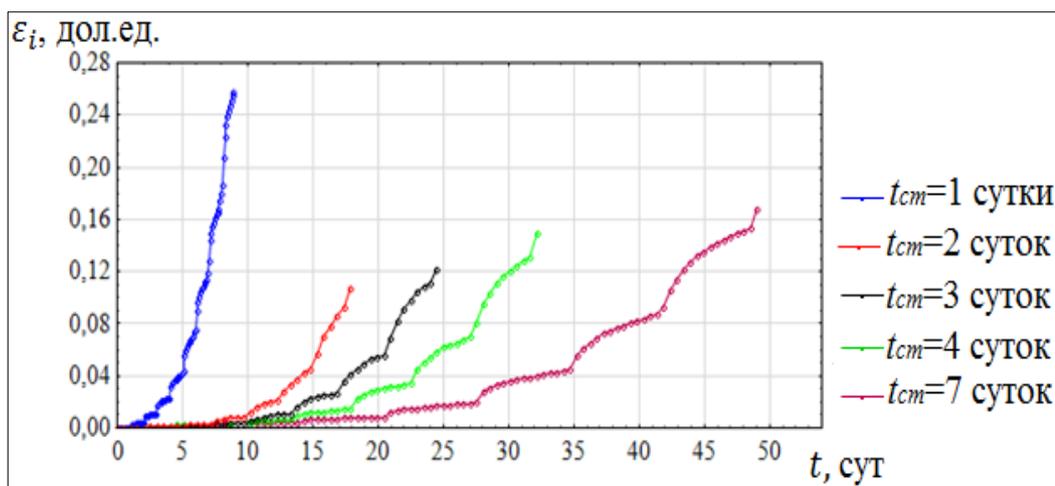
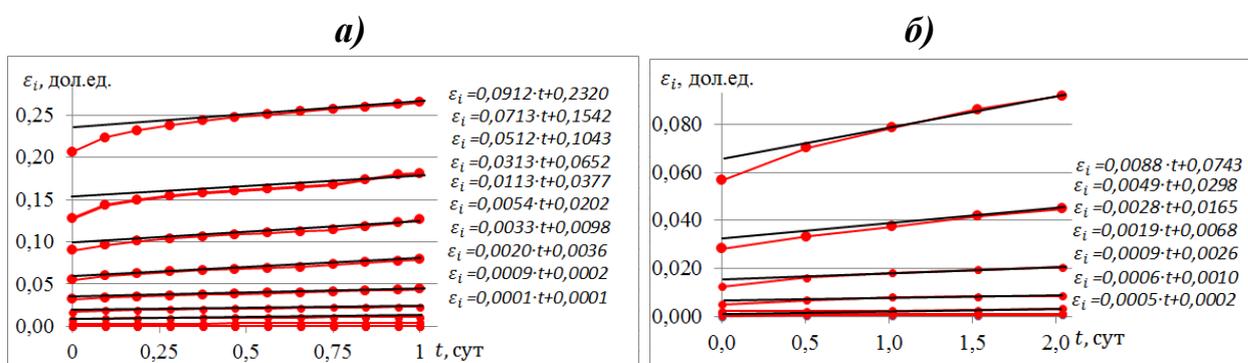


Рисунок 3.19– Графики зависимости интенсивности деформаций ε_i от времени t при разном времени выдержки напряжения на ступенях t_{cm}

Под влиянием действующих напряжений на ступенях происходит рост интенсивности деформаций во время всего эксперимента. Однако наибольший интерес для анализа представляют собой интенсивности при напряжениях, с которыми были проведены эксперименты прямым методом.

При испытаниях прямым методом, каждая кривая зависимости интенсивности деформаций от времени начинается в нулевой момент времени. Для вычисления и дальнейшего сравнительного анализа скоростей интенсивности, полученные зависимости на каждой ступени приведем к нулевому значению времени.



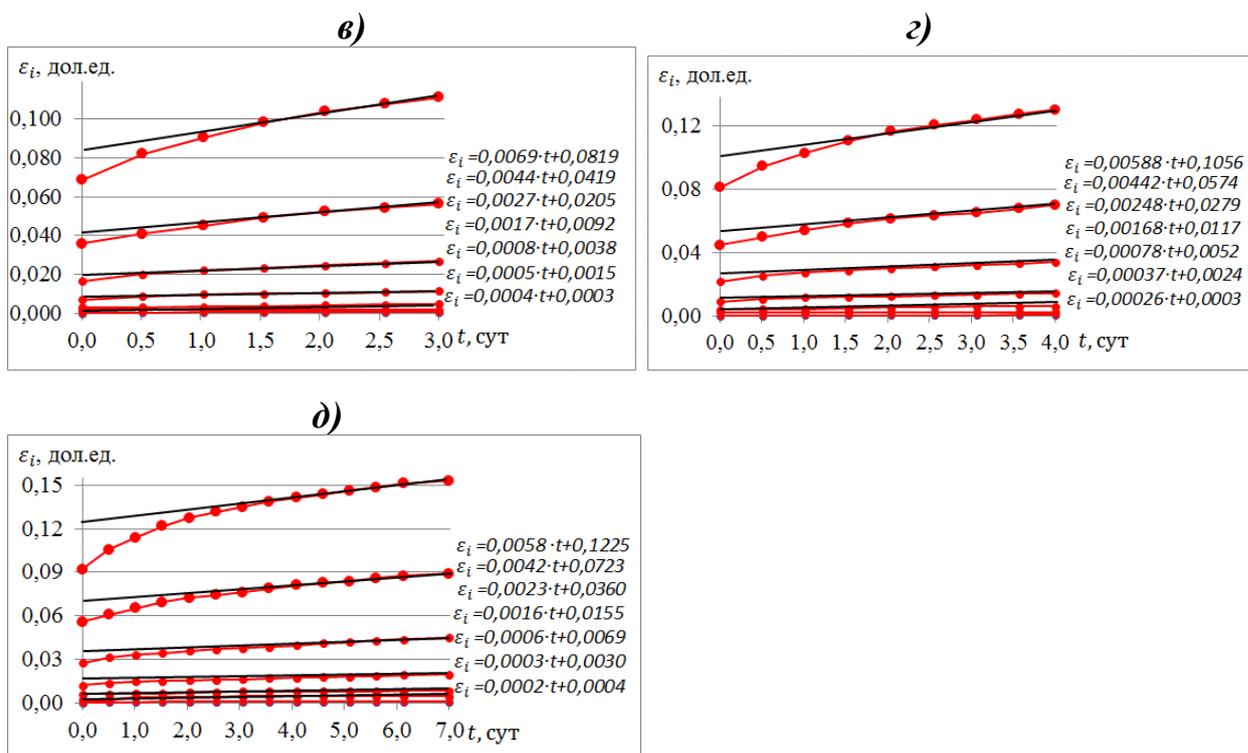


Рисунок 3.20– Графики зависимости интенсивности деформаций ϵ_i от времени t с уравнением касательной на конечном участке деформирования ступеней. а) - время выдержки 1 суток; б) - 2 суток; в) - 3 суток; г) - 4 суток; д) - 7 суток.

Таким образом, были определены необходимые параметры степенного закона ползучести (уравнение 3.2) для экспериментов, проведенных в режиме ступенчатого нагружения. Как следует из рисунка 3.20 наибольшие значения скорости интенсивности деформаций $\dot{\epsilon}_i$ у экспериментов, где время выдержки постоянного напряжения на ступени составляло 1 сутки. Очевидно, что дальнейшее незначительное увеличение скорости интенсивности деформаций при увеличении времени выдержки постоянного напряжения на ступени от 1 суток до 7 говорит о том, что процесс деформирования в данных экспериментах наиболее приближен к установившейся ползучести. Отметим, что под термином установившейся ползучести понимается процесс, при котором скорость деформирования приближена к постоянной. Для удобства анализа определенные параметры приведем в таблице ниже.

Таблица 3.6 – Скорости интенсивности деформаций $\dot{\epsilon}_i$, определенные в экспериментах при ступенчатом нагружении с различным временем выдержки постоянного напряжения на ступени

Интенсивность напряжений σ_i , МПа	Скорости интенсивности деформаций $\dot{\epsilon}_i$ при различном времени выдержки постоянного напряжения на каждой ступени				
	1 сут	2 сут	3 сут	4 сут	7 сут
12	0,0001	0,0005	0,0004	0,0003	0,0002
15	0,0009	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003
18	0,0020	0,0009	0,0008	0,0008	0,0006
21	0,0033	0,0019	0,0017	0,0017	0,0016
24	0,0054	0,0028	0,0027	0,0025	0,0023
27	0,0113	0,0049	0,0044	0,0044	0,0042
30	0,0313	0,0088	0,0069	0,0059	0,0058
33	0,0512	-	-	-	-
36	0,0713	-	-	-	-
39	0,0912	-	-	-	-

На основании полученных данных были построены графические зависимости.

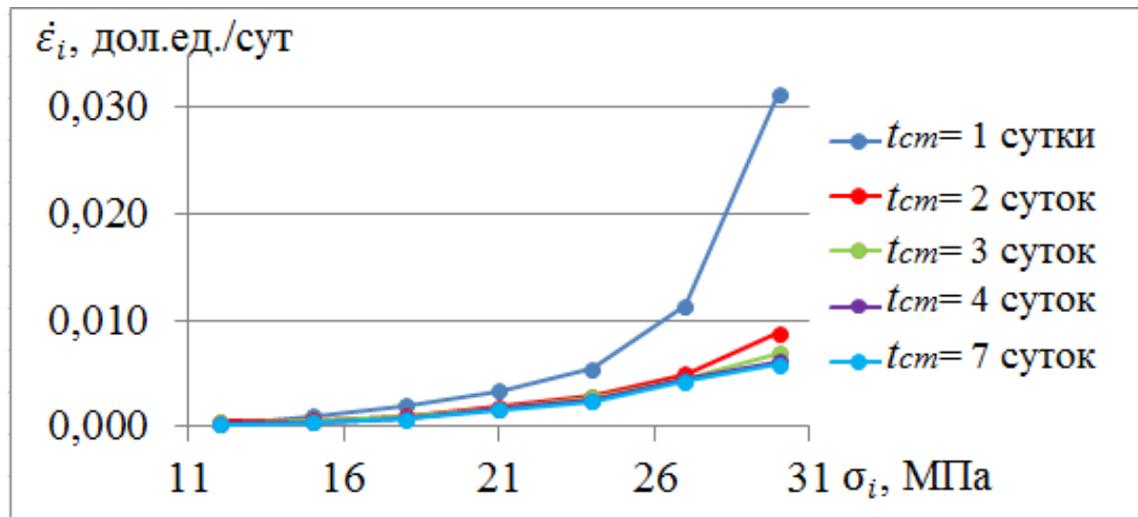


Рисунок 3.21– Графики зависимости скорости интенсивности деформирования $\dot{\epsilon}_i$ от интенсивности напряжений σ_i

Таким образом, на рисунке 3.21 можно заметить, что при времени выдержки постоянного напряжения на ступени от 2 суток до 7 графические зависимости близки друг к другу. При уменьшении времени выдержки до 1 суток, зависимость имеет большие значения. Для дальнейшего обоснования

параметров ступенчатого нагружения, произведем описание полученных зависимостей уравнением 3.8 и сравним их с данными, полученными при испытаниях проведенных прямым методом, отраженных в уравнении 3.11.

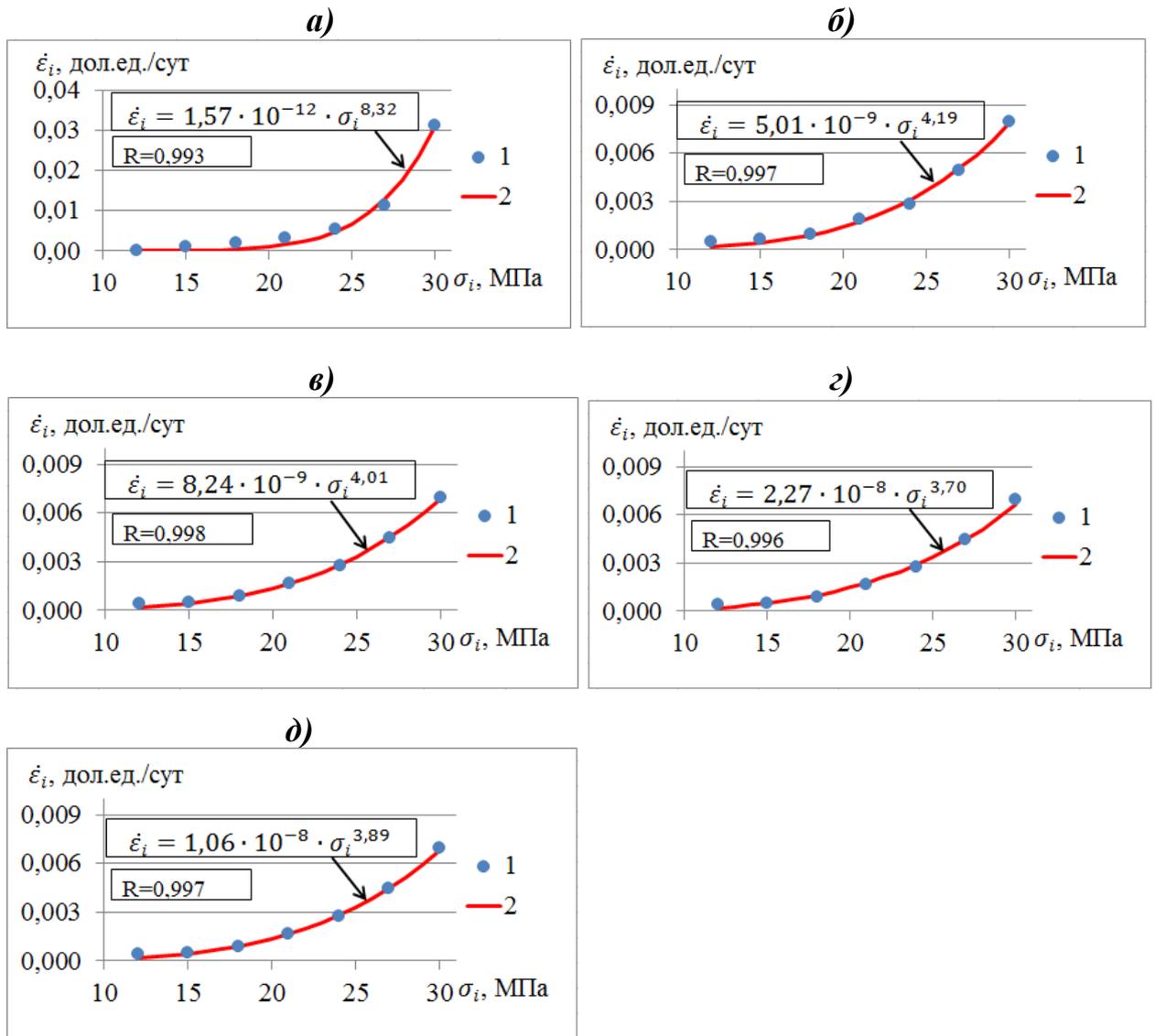


Рисунок 3.22– Графики описания зависимостей скоростей интенсивности деформирования $\dot{\epsilon}_i$ от интенсивности напряжений σ_i уравнением 3.22. На графиках 1 – экспериментальные точки; 2 – кривая описания уравнением. а) - время выдержки 1 сутки; б) - 2 суток; в) - 3 суток; г) - 4 суток; д) - 7 суток.

В процессе описания зависимостей скоростей интенсивности деформаций $\dot{\epsilon}_i$ от интенсивности напряжений σ_i уравнением 3.8, был получен набор значений n для различного времени выдержки постоянного

напряжения на ступени. Отметим тот факт, что среднеквадратическое отклонение R , при описании данных уравнением 3.8 было не ниже значения 0,993. Это говорит о высокой точности описания данных и позволяет проводить их дальнейший анализ.

Таблица 3.7 – Степенной параметр n уравнения 3.8, рассчитанный по результатам проведенных экспериментов прямым методом и методом ступенчатого нагружения

Время выдержки постоянного напряжения на ступени, t_{cm} , сут	Степенной параметр n уравнения 3.8
1	8,32
2	4,19
3	4,01
4	3,70
7	3,89
Прямой метод, сут	
13	3,9

По данным таблицы 3.7 построим график.

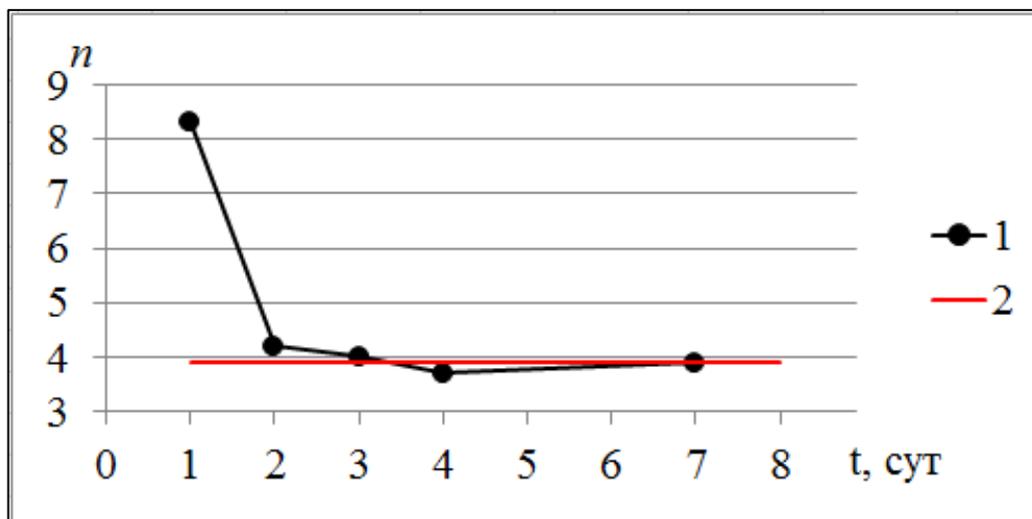


Рисунок 3.23– График зависимости степенного параметра n уравнения 3.8 от времени выдержки постоянного напряжения на ступени. 1- в режиме ступенчатого нагружения; 2 – эксперимент, проведенный прямым методом длительностью 13 суток.

Из рисунка 3.16 видно, что определенный параметр n при времени выдержки постоянного напряжения на ступени 1 сутки значительно выше, значения полученного прямым методом. Прослеживается зависимость, что в случае уменьшения времени, этот показатель будет расти. В обратном случае, из рисунка видно, что при увеличении времени выдержки до 2 суток и более существенного изменения параметра n не происходит, что свидетельствует о установившейся скорости интенсивности деформирования в проводимых экспериментах. Очевидным становится тот факт, что времени выдержки постоянного напряжения на ступени менее 2 суток недостаточно, для получения зависимости установившейся скорости интенсивности деформирования при экспериментах в режиме ступенчатого нагружения.

Наряду с достоинствами эксперимента проводимого методом ступенчатого нагружения, связанными, в первую очередь, с уменьшением количества времени эксперимента и сокращением количества образцов для экспериментов, есть еще один немаловажный плюс данного метода. Во время проведения эксперимента, методом ступенчатого нагружения, используется большой диапазон напряжений. Это дает преимущества при описании зависимости скорости интенсивности деформаций от интенсивности напряжений уравнением 3.8, так как в описании участвуют значения от минимальных напряжений, до напряжений, которые предшествуют разрушению образца. При необходимости, возможно, увеличить количество значений, уменьшив шаг ступени нагружения, что повысит точность получаемой зависимости (уравнение 3.8).

Для дальнейшего описания процесса деформирования методом ступенчатого нагружения степенным законом, аппроксимируем экспериментальные зависимости интенсивности деформаций от времени уравнением 3.14. Для каждого напряжения при различном времени выдержки постоянного напряжения на ступени определим коэффициенты A и n .

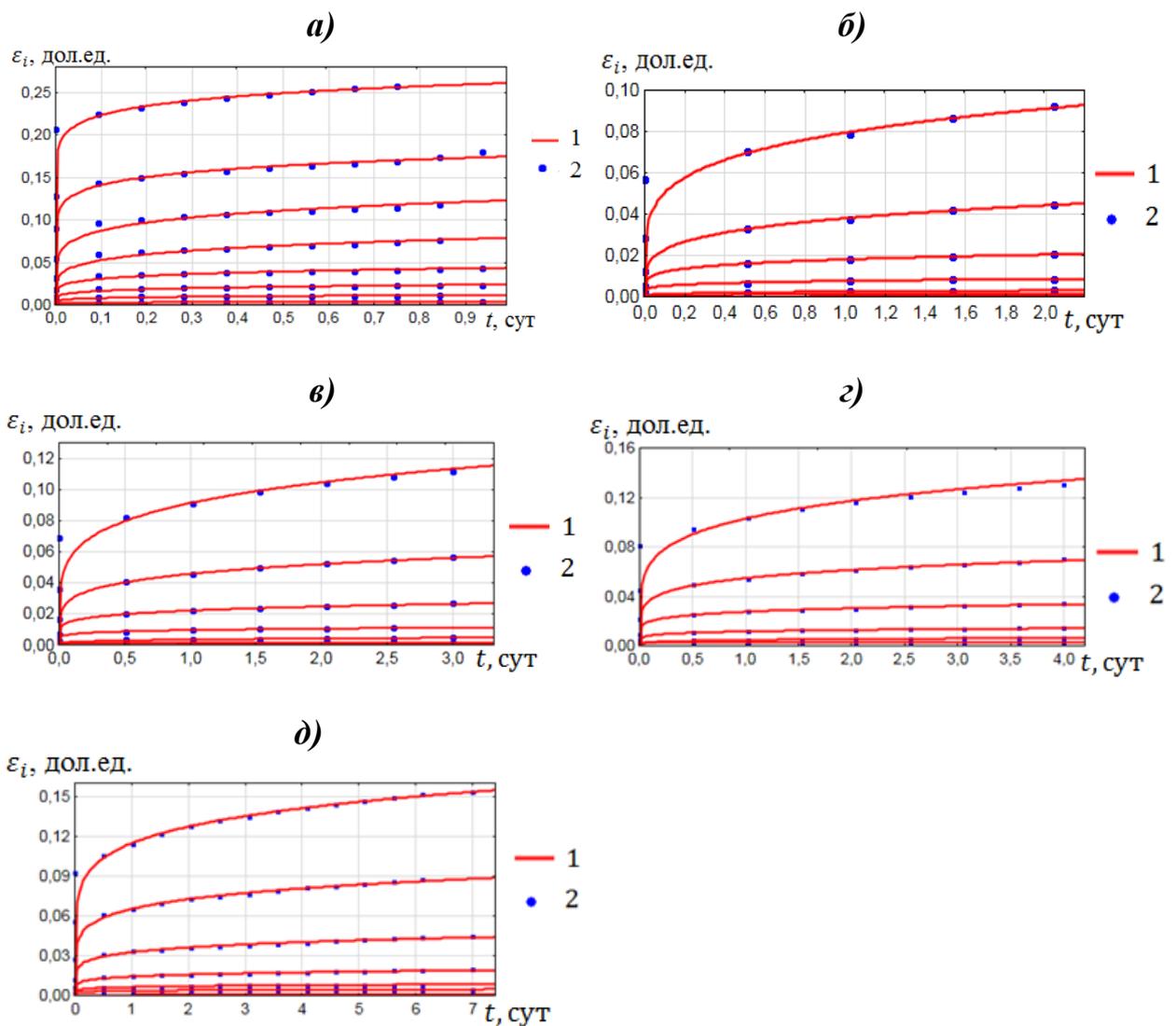


Рисунок 3.24– График зависимости интенсивности деформаций от времени с описанием уравнением 3.28. На рисунке 1- экспериментальные точки, 2 – кривая описания. а) - время выдержки 1 сутки; б) - 2 суток; в) - 3 суток; г) - 4 суток; д) - 7 суток.

Таким образом, описав каждую зависимость скорости интенсивности от времени уравнением 3.14 с известным степенным параметром n из таблицы 3.7, получаем серию уравнений для каждого напряжения на ступени при разном времени выдержки.

Время выдержки постоянного напряжения на ступени 1 сутки:

$$\text{При } \sigma_i = 12 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,45 \cdot 10^{-13} \cdot 12^{8,32} \cdot \frac{t^{(-0,851+1)}}{(-0,851+1)}$$

$$\text{При } \sigma_i=15 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,83 \cdot 10^{-13} \cdot 15^{8,32} \cdot \frac{t^{(-0,870+1)}}{(-0,870+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=18 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,67 \cdot 10^{-13} \cdot 18^{8,32} \cdot \frac{t^{(-0,840+1)}}{(-0,840+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=21 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,39 \cdot 10^{-13} \cdot 21^{8,32} \cdot \frac{t^{(-0,836+1)}}{(-0,836+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=24 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,22 \cdot 10^{-13} \cdot 24^{8,32} \cdot \frac{t^{(-0,846+1)}}{(-0,846+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=27 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,17 \cdot 10^{-13} \cdot 27^{8,32} \cdot \frac{t^{(-0,824+1)}}{(-0,824+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=30 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,94 \cdot 10^{-14} \cdot 30^{8,32} \cdot \frac{t^{(-0,851+1)}}{(-0,851+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=33 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,37 \cdot 10^{-14} \cdot 33^{8,32} \cdot \frac{t^{(-0,906+1)}}{(-0,906+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=36 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,20 \cdot 10^{-14} \cdot 36^{8,32} \cdot \frac{t^{(-0,931+1)}}{(-0,931+1)},$$

Время выдержки постоянного напряжения на ступени 2 суток:

$$\text{При } \sigma_i=12 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,39 \cdot 10^{-7} \cdot 12^{4,19} \cdot \frac{t^{(-0,713+1)}}{(-0,713+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=15 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,51 \cdot 10^{-7} \cdot 15^{4,19} \cdot \frac{t^{(-0,845+1)}}{(-0,845+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=18 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,76 \cdot 10^{-7} \cdot 18^{4,19} \cdot \frac{t^{(-0,723+1)}}{(-0,723+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=21 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,74 \cdot 10^{-7} \cdot 21^{4,19} \cdot \frac{t^{(-0,835+1)}}{(-0,835+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=24 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,10 \cdot 10^{-6} \cdot 24^{4,19} \cdot \frac{t^{(-0,824+1)}}{(-0,824+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=27 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,17 \cdot 10^{-6} \cdot 27^{4,19} \cdot \frac{t^{(-0,779+1)}}{(-0,779+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=30 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,23 \cdot 10^{-6} \cdot 30^{4,19} \cdot \frac{t^{(-0,802+1)}}{(-0,802+1)},$$

Время выдержки постоянного напряжения на ступени 3 суток:

$$\text{При } \sigma_i=12 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,74 \cdot 10^{-7} \cdot 12^{4,01} \cdot \frac{t^{(-0,601+1)}}{(-0,601+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=15 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,11 \cdot 10^{-7} \cdot 15^{4,01} \cdot \frac{t^{(-0,965+1)}}{(-0,965+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=18 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,93 \cdot 10^{-7} \cdot 18^{4,01} \cdot \frac{t^{(-0,731+1)}}{(-0,731+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=21 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,72 \cdot 10^{-7} \cdot 21^{4,01} \cdot \frac{t^{(-0,861+1)}}{(-0,861+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=24 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,11 \cdot 10^{-6} \cdot 24^{4,01} \cdot \frac{t^{(-0,839+1)}}{(-0,839+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=27 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,16 \cdot 10^{-6} \cdot 27^{4,01} \cdot \frac{t^{(-0,814+1)}}{(-0,814+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=30 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,23 \cdot 10^{-6} \cdot 30^{4,01} \cdot \frac{t^{(-0,803+1)}}{(-0,803+1)},$$

Время выдержки постоянного напряжения на ступени 4 суток:

$$\text{При } \sigma_i=12 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,10 \cdot 10^{-6} \cdot 12^{3,7} \cdot \frac{t^{(-0,718+1)}}{(-0,718+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=15 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,19 \cdot 10^{-7} \cdot 15^{3,7} \cdot \frac{t^{(-0,748+1)}}{(-0,748+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=18 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,82 \cdot 10^{-7} \cdot 18^{3,7} \cdot \frac{t^{(-0,788+1)}}{(-0,788+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=21 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,77 \cdot 10^{-7} \cdot 21^{3,7} \cdot \frac{t^{(-0,855+1)}}{(-0,855+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=24 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,11 \cdot 10^{-6} \cdot 24^{3,7} \cdot \frac{t^{(-0,855+1)}}{(-0,855+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=27 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,17 \cdot 10^{-6} \cdot 27^{3,7} \cdot \frac{t^{(-0,930+1)}}{(-0,930+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=30 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 30^{3,7} \cdot \frac{t^{(-0,806+1)}}{(-0,806+1)},$$

Время выдержки постоянного напряжения на ступени 7 суток:

$$\text{При } \sigma_i=12 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,10 \cdot 10^{-6} \cdot 12^{3,89} \cdot \frac{t^{(-0,823+1)}}{(-0,823+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=15 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,12 \cdot 10^{-6} \cdot 15^{3,89} \cdot \frac{t^{(-0,838+1)}}{(-0,838+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=18 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,10 \cdot 10^{-6} \cdot 18^{3,89} \cdot \frac{t^{(-0,850+1)}}{(-0,850+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=21 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,13 \cdot 10^{-6} \cdot 21^{3,89} \cdot \frac{t^{(-0,844+1)}}{(-0,844+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=24 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,19 \cdot 10^{-6} \cdot 24^{3,89} \cdot \frac{t^{(-0,840+1)}}{(-0,840+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=27 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,24 \cdot 10^{-6} \cdot 27^{3,89} \cdot \frac{t^{(-0,837+1)}}{(-0,837+1)},$$

$$\text{При } \sigma_i=30 \text{ Мпа} \rightarrow \varepsilon_i = 0,28 \cdot 10^{-6} \cdot 30^{3,89} \cdot \frac{t^{(-0,841+1)}}{(-0,841+1)},$$

Таким образом, были получены коэффициенты A , m и n , входящие в степенной закон ползучести для экспериментов проводимых в режиме ступенчатого нагружения с различным временем выдержки постоянного напряжения на ступени. Данные параметры приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – коэффициенты степенного закона ползучести для экспериментов проводимых в режиме ступенчатого нагружения и прямым методом

Метод ступенчатого нагружения															
σ_i , МПа	Время выдержки постоянного напряжения на ступени														
	1 сутки			2 суток			3 суток			4 суток			7 суток		
	<i>A</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
12	$0,45 \cdot 10^{-13}$	-0,851	8,32	$0,39 \cdot 10^{-7}$	-0,713	4,19	$0,75 \cdot 10^{-7}$	-0,601	4,01	$0,11 \cdot 10^{-6}$	-0,718	3,70	$0,10 \cdot 10^{-6}$	-0,823	3,89
15	$0,83 \cdot 10^{-13}$	-0,870		$0,51 \cdot 10^{-7}$	-0,845		$0,11 \cdot 10^{-7}$	-0,965		$0,94 \cdot 10^{-7}$	-0,748		$0,13 \cdot 10^{-6}$	-0,838	
18	$0,67 \cdot 10^{-13}$	-0,840		$0,76 \cdot 10^{-7}$	-0,723		$0,93 \cdot 10^{-7}$	-0,731		$0,81 \cdot 10^{-7}$	-0,788		$0,10 \cdot 10^{-6}$	-0,850	
21	$0,39 \cdot 10^{-13}$	-0,836		$0,74 \cdot 10^{-7}$	-0,835		$0,72 \cdot 10^{-7}$	-0,861		$0,77 \cdot 10^{-7}$	-0,855		$0,13 \cdot 10^{-6}$	-0,844	
24	$0,22 \cdot 10^{-13}$	-0,846		$0,10 \cdot 10^{-6}$	-0,824		$0,11 \cdot 10^{-6}$	-0,839		$0,12 \cdot 10^{-6}$	-0,855		$0,19 \cdot 10^{-6}$	-0,840	
27	$0,17 \cdot 10^{-13}$	-0,824		$0,17 \cdot 10^{-6}$	-0,779		$0,17 \cdot 10^{-6}$	-0,814		$0,17 \cdot 10^{-6}$	-0,930		$0,24 \cdot 10^{-6}$	-0,837	
30	$0,94 \cdot 10^{-14}$	-0,851		$0,23 \cdot 10^{-6}$	-0,802		$0,24 \cdot 10^{-6}$	-0,803		$0,25 \cdot 10^{-6}$	-0,806		$0,28 \cdot 10^{-6}$	-0,841	
33	$0,37 \cdot 10^{-14}$	-0,906		-	-		-	-		-	-		-	-	
36	$0,20 \cdot 10^{-14}$	-0,931		-	-		-	-		-	-		-	-	
	Среднее														
	$0,32 \cdot 10^{-13}$	-0,861	8,32	$0,10 \cdot 10^{-6}$	-0,788	4,19	$0,11 \cdot 10^{-6}$	-0,802	4,01	$0,13 \cdot 10^{-6}$	-0,814	3,70	$0,17 \cdot 10^{-6}$	-0,839	3,89
	Прямой метод														
	<i>A</i>			<i>m</i>			<i>n</i>								
18	$0,94 \cdot 10^{-7}$			-0,776			3,9								
24	$0,10 \cdot 10^{-6}$			-0,815											
30	$0,14 \cdot 10^{-6}$			-0,851											
	Среднее														
	$0,11 \cdot 10^{-6}$			-0,814			3,9								

Расчёт параметров степенного закона ползучести по данным, полученным в результате экспериментов проводимых методом ступенчатого нагружения и прямым методом показал, что при времени выдержки постоянного напряжения на ступени менее 2 суток, параметр A и m многократно отличается от параметров, рассчитанных по результатам прямого метода. Дальнейшее увеличение времени выдержки постоянного напряжения на ступени незначительно влияет на количественное изменение параметров. В таблице 3.8. представлены средние значения полученных величин на каждой ступени, рассчитанные по формуле 3.15 и 3.16. Представим полученные данные в виде графика.

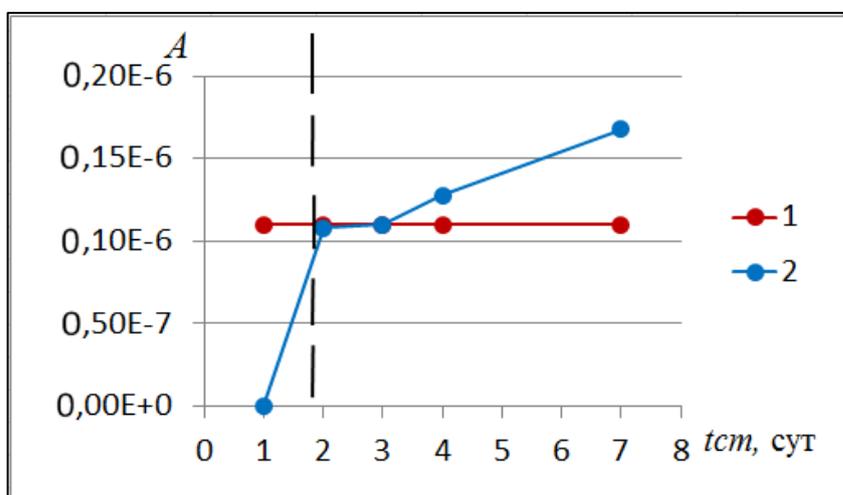


Рисунок 3.25 – График зависимости степенного параметра A от времени выдержки постоянного напряжения на ступени t_{cm} . 1 – данные полученные по результатам проводимых прямым методом. 2 – по результатам экспериментов методом ступенчатого нагружения

Как видно из рисунка 3.25, по данным полученным в ходе экспериментов в режиме ступенчатого нагружения, возможно провести границу, которая разделяет данные полученные при времени на ступени менее 2 суток и более. Разница в полученных данных очевидна. При времени выдержки на ступени 1 сутки значения имеют намного меньшие показатели, что отражено в таблице 3.8 и отражено на рисунке 3.25. После увеличения времени выдержки постоянного напряжения на ступени до 2 суток и более

параметр A приближен к значению, полученному по результатам эксперимента проводимого прямым методом. Так же стоит отметить, что при увеличении времени выдержки на ступени t_{cm} , параметр A незначительно увеличивается, это вызвано тем, что за счёт уплотнения каменной соли в ходе эксперимента, ее способность сопротивляться действующим напряжениям возрастает.

Наряду с оценкой параметра A , представим изменение параметра m в виде графической зависимости от времени выдержки постоянного напряжения на ступени.

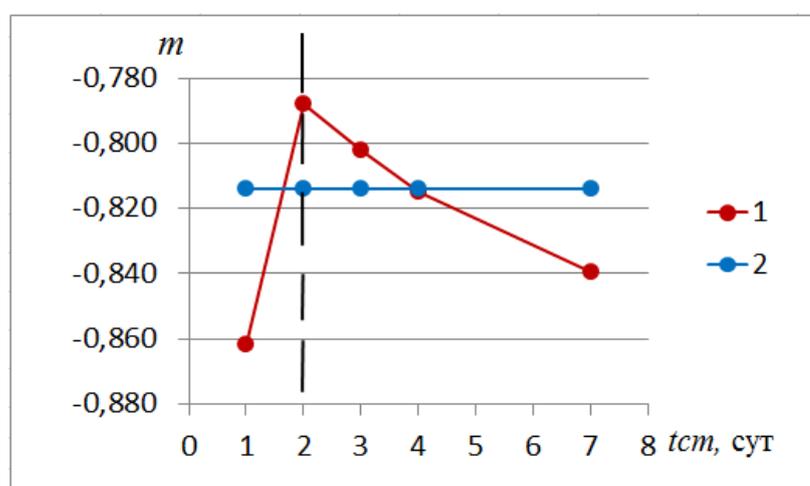


Рисунок 3.26 – График зависимости степенного параметра m от времени выдержки постоянного напряжения на ступени t_{cm} . 1 – данные полученные по результатам проводимых прямым методом. 2 – по результатам экспериментов методом ступенчатого нагружения

По аналогии с рисунком 3.25 на рисунке 3.26 возможно так же данные разделить на две области. По рисунку видно, что при времени выдержки постоянного напряжений на ступени 1 сутки, параметр m имеет наименьшее значение. Это говорит о том, что на данном участке деформирования, очень медленно происходит затухание скорости. При времени выдержки на ступени 2 суток параметр m имеет наибольшее значение, это говорит о том, что в этом случае произошло максимальное затухание скорости деформирования. После увеличения скорости времени выдержки на ступени от 2 суток до 7 параметр m уменьшается, это говорит о том, что

максимальное затухание произошло при времени выдержки 2 суток и в дальнейшем, затухание происходит очень медленно. Приведенные данные свидетельствуют о том, что максимальное затухание скорости деформирования происходит при времени выдержки постоянного напряжения на ступени 2 суток.

Далее на основании данных, полученных в результате обработки экспериментов, проведенных методом ступенчатого нагружения, опишем зависимости полученных в ходе экспериментов, проводимых прямым методом.

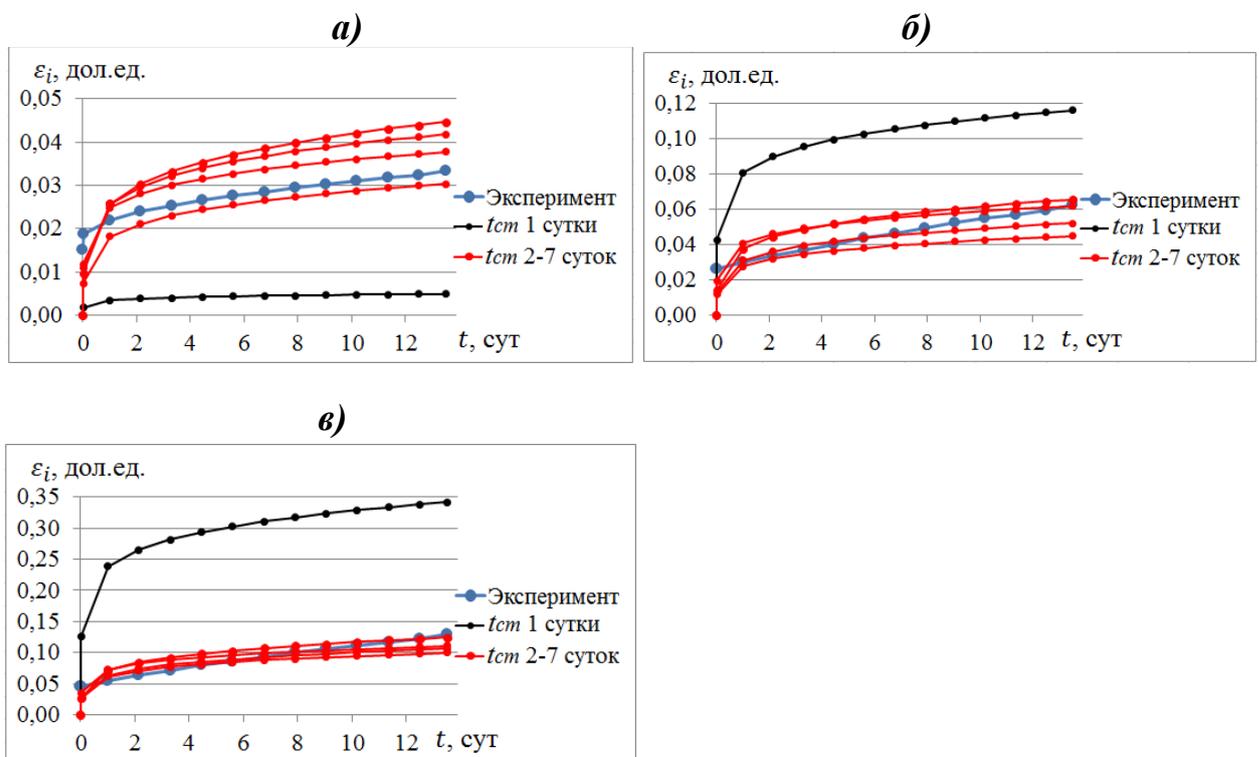


Рисунок 3.27 – График зависимости экспериментальных данных интенсивности деформаций ε_i от времени t и расчётных данных, по результатам определения параметров степенного закона ползучести с различным временем выдержки постоянного напряжения на ступени. а) - $\sigma_i=18$ МПа; б) - $\sigma_i=24$ МПа; в) - $\sigma_i=30$ МПа.

Из рисунка видно, что прогнозные зависимости интенсивности деформаций от времени, рассчитанные по результатам экспериментов проводимых методом ступенчатого нагружения, с временем выдержки

постоянного напряжения на ступени свыше 2 суток, согласуются с данными, проводимыми прямым методом. При времени выдержки постоянного напряжения на ступени 1 сутки, прогнозные зависимости значительно отличаются от экспериментальных зависимостей.

Выводы к главе 3:

1. При проведении экспериментов по определению реологических характеристик в режиме трехосного сжатия методом ступенчатого нагружения достаточным условием является наличие 6 ступеней нагружения, при условии достижения нагрузок, при которых происходит разрушение образца.

2. В том случае, когда время выдержки постоянного напряжения на ступени меньше времени, за которое скорость деформирования приближается к постоянному значению, деформации имеют значения больше чем, при времени выдержки постоянного напряжения, за которое скорость успевает приблизиться к постоянному значению, при одном и том же уровне напряжений.

3. Анализ данных полученных в ходе экспериментов, проводимых прямым методом и методом ступенчатого нагружения в режиме трехосного сжатия показал, что для прогноза длительного деформирования каменной соли, возможно применять данные ступенчатого нагружения с временем выдержки постоянного напряжения на ступени не менее 2 суток.

Глава 4. Методика проведения испытаний каменной соли методом ступенчатого нагружения в условиях одноосного и трехосного сжатия

4.1. Общие положения

1. Данная методика основана на диссертационной работе «Разработка методики ступенчатого испытания соляных пород с целью определения параметров ползучести»

2. Методика устанавливает параметры величин напряжения на ступенях и времени выдержки постоянного напряжения, при лабораторном определении реологических характеристик каменной соли в режимах ступенчатого нагружения.

3. Сущность методики заключается в оптимизации процесса определения реологических характеристик каменной соли за счёт уменьшения времени выдержки постоянного напряжения на ступенях до минимальных значений, без потери качества получаемых результатов относительно прямых методов испытания.

4. Оборудование, материалы, инструменты и размеры образцов при проведении испытаний в условиях одноосного нагружения - по ГОСТ 21153.2 -84[60], в условиях трехосного по - ГОСТ 21153.8 -84 [85] со следующими дополнениям:

- допускаемый диаметр цилиндрического образца от 30 до 100 мм, при отношении высоты к диаметру $2,0 \pm 0,1$ ед.;

- возможность замера осевых и поперечных деформаций с точностью 0,01 мм;

- возможность оборудования поддерживать заданную нагрузку с отклонением не более 0,5 МПа не менее 300 часов.

4.2. Условные обозначения

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные действующие нормальные напряжения, МПа;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные линейные деформации, дол.ед.;

$\rho_{об}$ – плотность образца, кг/м³;

$m_{обр}$ – масса образца, кг;

d – диаметр образца, м;

$h_{обр}$ – высота образца, м.

$\sigma_{сж}$ – предел прочности на одноосное сжатие, МПа;

$\Delta\sigma_{одн}$ – величина ступени нагружения в режиме одноосного нагружения, МПа;

k – коэффициент, имеет значение $k=1$ и $k=2$;

σ_v – напряжение, действующее в массиве, МПа;

ρ – плотность вышележащих горных пород, кг/м³;

h – глубина заложения кернового материала, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

$\sigma_{ср}$ – среднее напряжение (среднеосевое), МПа;

$\Delta\sigma$ – разность главных напряжений, МПа;

σ_n – напряжения, действующие на n -ой ступни нагружения, МПа;

$t_{см}$ – время выдержки постоянного напряжения на ступени, час.

4.3. Выбор величины нагружения

а) Принимаем главные напряжения, создаваемые по перпендикулярным площадкам $\sigma_z, \sigma_x, \sigma_y$ как $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Напряжения и деформации сжатия принимаются положительными руководствуясь.

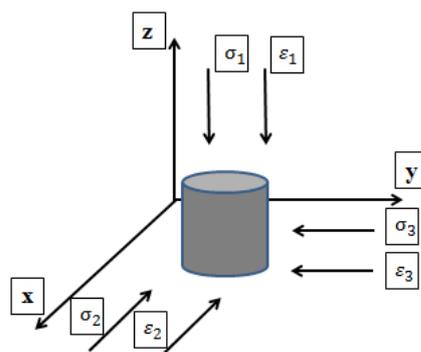


Рисунок 3.1 – Схема обозначения главных напряжений и деформаций

б) Для проведения реологических испытаний методом ступенчатого нагружения выбирается напряженное состояние сжатия:

- одноосное $\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$;

- трехосное или объемное, $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$ (схема Т. Кармана).

4.3.1. Метод ступенчатого нагружения в условиях одноосного сжатия

а) Вычисляют плотность образцов по следующей формуле:

$$\rho_{об} = \frac{4 \cdot m_{обр}}{\pi \cdot d^2 \cdot h_{обр}} \quad (4.1)$$

Масса образца измеряется с точностью 1 грамм, линейные размеры образца измеряются с точность 0,1 мм. Для испытаний отбираются образцы одной плотности с коэффициентом вариации не более 5%.

б) Проводится серия экспериментов по определению предела прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ по ГОСТ 21153.2-84.[60]

в) Величина ступени нагружения рассчитывается по формуле:

$$\Delta\sigma_{одн} = k \cdot \frac{\sigma_{сж}}{10}, \text{ МПа} \quad (4.2)$$

Для первой ступени нагружения принимается $k = 2$, для последующих $k = 1$.

д) Время выдержки постоянного напряжения на ступени $t_{ст}$ должно быть равно 48 часов.

4.3.2. Метод ступенчатого нагружения в условиях трехосного сжатия

а) Перед определением величины ступени нагружения в режиме трехосного сжатия выполняются п.п. а) и б) раздела 4.3.1 настоящей методики.

б) Определяется величина σ_v по формуле:

$$\sigma_v = 2,5 \cdot \rho \cdot g \cdot h, \text{ МПа} \quad (4.3)$$

в) Рассчитывается величина среднего (среднеосевого) напряжения:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_v}{3}, \text{ МПа} \quad (4.4)$$

Плавно, без скачков, задается равнокомпонентное поле напряжений из условия $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{\text{ср}}$.

г) Для создания ступеней нагружения увеличивают осевое напряжение и уменьшают боковое, тем самым увеличивая разность главных напряжений $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$ при условии $\sigma_2 = \sigma_3$. Схематично показано на рисунке 4.1.

д) Время выдержки постоянного напряжения на ступени $t_{\text{ст}}$ должно быть равно 48 часов.

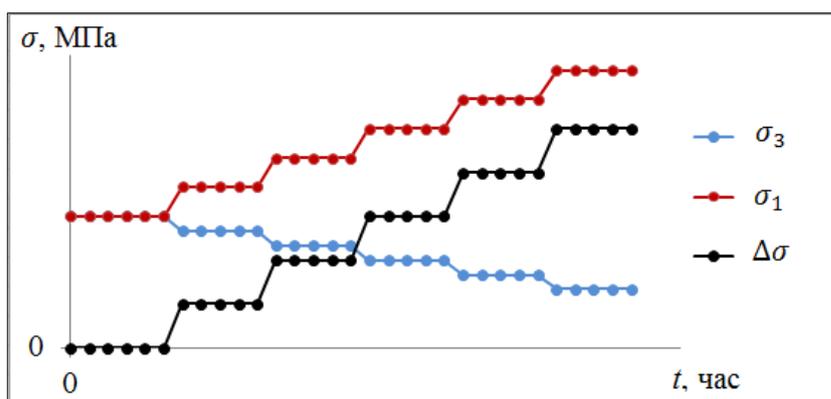


Рисунок 4.1 – Схема нагружения образца при испытаниях в условиях

Величина $\Delta\sigma$ рассчитывается по формуле:

$$\Delta\sigma = k \cdot \frac{\sigma_{\text{сж}}}{10}, \text{ МПа} \quad (4.5)$$

Для каменной соли с пределом прочности на сжатие $\sigma_{\text{сж}} > 20$ МПа принимается $k = 2$. В случае $\sigma_{\text{сж}} < 20$ МПа рекомендуется принимать $k = 1$. –осевое напряжение на последующей ступени рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_n + \frac{\Delta\sigma}{2}, \text{ МПа} \quad (4.6)$$

- боковое напряжение на последующей ступени рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{n+1} = \sigma_n - \frac{\Delta\sigma}{4}, \text{ МПа} \quad (4.7)$$

Приведенные соотношения позволяют выдержать условие $\sigma_v = const$ на протяжении всего эксперимента.

4.4. Результаты экспериментов

а) Результаты экспериментов оформляются в табличном и графическом виде. Таблица с результатами экспериментов должна содержать: номер образца, линейные размеры образцов, описание образцов, место отбора проб, предел прочности на сжатие, время проведения эксперимента, деформации продольные, деформации поперечные, главные нормальные напряжения. Ниже приведен пример таблицы.

Таблица 4.1 – Пример оформления результатов экспериментов

№ образца	-	
Высота h , мм	-	
Диаметр d , мм	-	
Описание образца	-	
Место отбора проб	-	
$\sigma_{сж}$ схожих образцов, МПа	-	
σ_1 , МПа	-	
σ_3 , МПа	-	
Экспериментальные данные		
t , час	ε_1 , дол.ед	ε_3 , дол.ед
-	-	-

б) По результатам экспериментов строятся кривые ползучести. На рисунке 4.2 приведен рекомендованный пример построения.

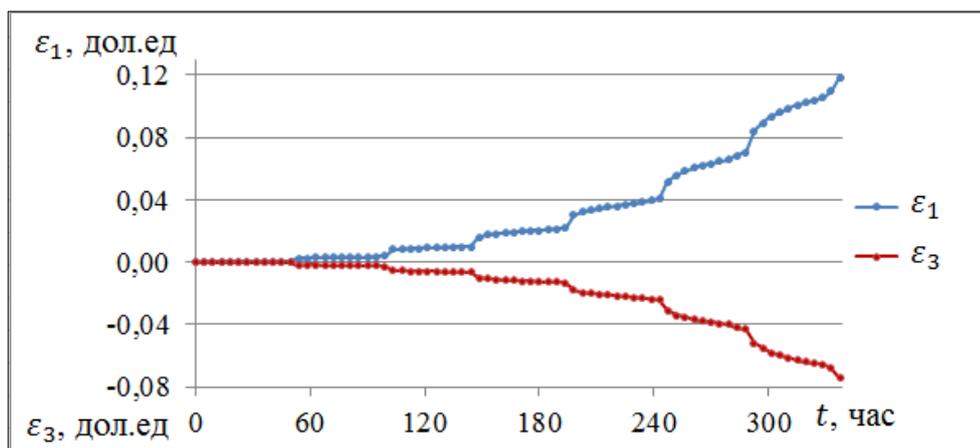


Рисунок 4.2 – Рекомендованный пример построения кривых ползучести.

в) Все ступени деформирования приводятся графически от нуля по времени. На рисунке 4.3 представлен рекомендованный пример оформления.

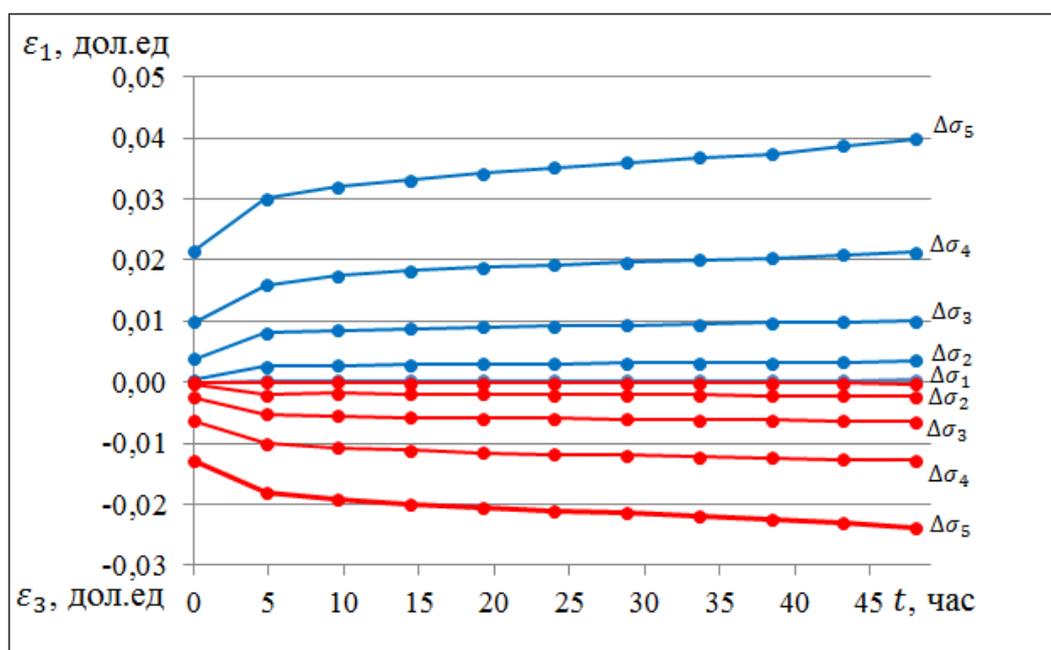


Рисунок 4.3 – Рекомендованный пример построения кривых ползучести от нуля по времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором экспериментальных и теоретических исследований закономерностей поведения каменной соли при её испытаниях методом ступенчатого нагружения в условиях одноосного и трёхосного сжатия решена актуальная научная задача обоснования и разработки методики реологических испытаний каменной соли, обеспечивающей требуемую точность и минимальное время определения параметров ползучести при ограниченном числе образцов, за счёт оптимального выбора количества и длительности ступеней их нагружения, что имеет важное значение для повышения качества информационного обеспечения проектирования и строительства подземных хранилищ газа в массивах соляных горных пород.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Установлено, что существуют параметры экспресс-метода ступенчатого нагружения образцов каменной соли при которых результаты определения параметров ползучести будут соответствовать результатам, полученными методом непрерывного нагружения образцов;

2. Определены основные параметры, позволяющие оптимизировать экспресс-метод исследования ползучести каменной соли, для сокращения времени проведения испытаний, а также получения максимальной информации о поведении соляных пород под нагрузкой с минимальным количеством исследуемых породных образцов;

3. Установлено, что время действующего напряжения на каждой ступени при экспресс-методе, необходимое и достаточное для достоверного получения характеристик деформирования при одноосном и трехосном испытании должно составлять 48 часов, при меньшем времени параметры ползучести по сравнению с непрерывным нагружением будут завышены;

4. Экспериментально установлено, что для определения скорости деформации каменной соли с погрешностью не более 15 % от данных, полученных прямым методом, количество ступеней нагружения при одноосном и трехосном испытании образцов каменной соли должно быть равно шести;

5. По результатам статистической обработки экспериментальных данных было получено уравнение и входящие в него коэффициенты для математического описания продольных деформаций каменной соли при одноосном нагружении в зависимости от действующей нагрузки и времени;

6. По результатам проведенных трехосных испытаний образцов каменной соли при различном уровне напряжений были рассчитаны коэффициенты степенного закона ползучести, описывающие скорость интенсивности деформаций от действующей интенсивности напряжений и времени;

7. Разработана методика проведения испытаний каменной соли экспресс-методом (методом ступенчатого нагружения) в условиях одноосного и трехосного сжатия, в рамках которой приведены требования к качеству изготавливаемых образцов, средствам и режимам проведения измерений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.А. Геология галогенных отложений (формаций) / Левицкий Ю.Ф. // СССР. Москва. Госгеолтехиздат.- 1960.- 424 с.
2. Савоненков В.Г. Геохимические исследования подземных ядерных взрывов в каменной соли как аналогов захоронения РАО в соляных формациях / Шабалев С.И. // Санкт-Петербург.- 2014.- 272 с.
3. Пермяков Р.О. Исследование физико-механических свойств, процесса деформирования и разрушения соляных пород / Соломенцев Г.Г., Гаркушин П.К. // Труды ВНИИГалургии. Л.- 1974.- Вып. 67.- С. 108-119.
4. СП 123.13330.2012 Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. // Актуализированная редакция СНиП 34-02-99.
5. ГОСТ СССР. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. // ГОСТ 28985-91. Комитет стандартизации и метрологии СССР. Москва. Издательство стандартов.- 1991.- 15 с.
6. 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.
7. Мор О. Чем обусловлен предел прочности и временное сопротивление материала. // «Новые идеи в технике».- Сборник №1. Теория прочности.- Петроград.- Из-во «Образование».- 1915 г.
8. Карташов Ю.М. Ускоренные методы определения реологических свойств горных пород // Москва. Недра.- 1973. - 112 с.
9. Sing D. P. Long-term strength of rock. // Colliezy Guazdian.- 1977.- Vol. 225.- №11.-P. 861-866.
10. Desayi P. True ultimate Strenght of plain concrete. / C.S. Veswanatha // Bulletin RILEM.- №36.- 1967.- P. 163-173.
11. Карташов Ю.М. Об определении длительной прочности соленосных пород / Титов Б.В. // Труды ВНИИГалургии.- Вып. 77.- Л.- 1975.- С. 77-84.

12. Singh. D.P. Long-term strength of rock. // Colliery Guazdian.- 1977.- Vol. 225.- №11.- P. 861-866
13. Вялов С.О. Закономерности длительной прочности грунтов. // В кн.: Труды к УП международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению.- Москва.- 1969.- С. 56-65.
14. Вялов С.С. Методика определения характеристик ползучести, длительной прочности и сжимаемости мёрзлых грунтов / Городецкий С.Э., Ермаков В.Ф. // Наука.- Москва.- 1966.- 132 С.
15. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород // Углетехиздат.- Москва.- 1947. - 179 с.
16. Кузнецов Г.Б. Влияние скорости нагружения на длительную прочность материалов при ползучести и релаксации / Поздеев А.А. // Тезисы докладов конференции "Наука и технический прогресс в машиностроении".- Минск.- 1974.- С. 69.
17. Оксенкрут Е.С. Исследование реологических свойств каменной соли для расчета деформаций подземных ёмкостей // Дис. канд. техн. наук. - Москва.- 1976.- 163 С.
18. Ставрогин А.Н. Ползучесть и временная зависимость прочности горных пород / Лодус Е.В. // Физ.-техн. проблемы разраб. полезн. Ископаемых.- 1974. № 6.- С. 3-10.
19. Ставрогин А.Н. Экспериментальные исследования ползучести и долговечности горных пород // В кн.: Труды координационных совещаний по гидротехнике.- 1968.- Вып.38.- С. 228-239.
20. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов угольных карьеров // Углетехиздат.- Москва.- 1956.- 230 С.
21. Карташов Ю.М. Методические указания по ускоренным лабораторным испытаниям слабых горных пород на длительную прочность // Ленинград. ВНИМИ.- 1966. - 34 С.
22. Bieniawski Z.T. Failure of fractured rock / H.G. Denkhaus, U.W. Voglez // Int. j. Rock. Mech. Min. Sci.- 1969.- Vol. 6.- №3.- P. 323-341.

23. Карташов Ю.М. Прочность и деформируемость горных пород / Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. // Москва. Недра.- 1979.- 269 С.
24. Пермяков Р.О. Исследование физико-механических свойств, процесса деформирования и разрушения соляных пород. / Соломенцев Г.Г., Гаркушин П.К. // Труды ВНИИГалургии. Ленинград.- 1974.- Вып.67.- С. 108-119.
25. Ямщиков В.С. О возможностях определения вязкопластических свойств горных пород акустическими методами / Лыкова Э.А // В кн.: Проблемы реологии горных пород.- 1969.- С. 271-277.
26. Singh D.P. The prediction and Measurement of the long-term strength of rocks / W.E. Bamford // Of the First Geomechanics Conference. Australia. August.- 1971.- Vol. 1.- P. 37-44.
27. Носиков А.В. Исследование ползучести каменных солей и применение в инженерных расчетах конструкции скважин/ Коротков С.А., Трясин Е.Ю., Торопецкий К.В., Михайлов Б.О., Борисов Г.А. // Экспозиция Нефть Газ.- 2018.- № 7 (67).- С. 29-36.
28. Воларович М.П. Механика горных пород при высоких давлениях / Томашевская И. О., Будников В. А. // Наука.- Москва.- 1979.- 152 С.
29. Сивоконь Е.П. Приближенный метод расчета целиков при сложном напряженном состоянии // Межвузовский сборник научных трудов.- Пермь.- 1976.- №190.- С. 17-21.
30. Титов Б.В. Исследование и разработка метода определения длительной прочности соляных горных пород при сжатии // Березнеки.- 1983.- 145 С.
31. Тавостин М.Н. Влияние вида напряженного состояния на реологические свойства каменной соли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2000.- №8.- С. 125-128.

32. Liu B. A nonlinear rheological model of rock salt based on DS-dashpot under cyclic loading / H. Xu, L. Dong, Y. Ma, K. Li // *Rock and Soil Mechanics*.- 2018.- V. 39.- P. 107-114.
33. Brandao N. B. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks / D. Roehl // *Acta Geotechnica*.- 2018.- V. 13.- P. 1329-1340.
34. Смирнов В.И. Строительство подземных газонефтехранилищ. Газоил пресс.– Москва.- 249 С.
35. Singh A. Estimation of creep parameters of rock salt from uniaxial compression tests / C. Kumar, L. G. Kannan, K. S. Rao // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.- 2018.- V. 107.- P. 243-248.
36. Смелянский Р.И. Математическое моделирование процессов компактирования и экструзии низкотемпературных термоэлектрических материалов // Магистерская диссертация 22.04.01_09.- ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».- 60 С.
37. Wu C. Study on creep properties of salt rock with impurities during triaxial creep test / J. Liu, Z. Zhou, H. Xu, F. Wu, Y. Zhuo // *Gongcheng Kexue Yu Jishu. Advanced Engineering Science*.- 2017.- V. 49.- P. 165-172.
38. Doremus P. Simple tests and standard procedure for the characterization of green compacted powder / P. Doremus, F. Toussaint, O. Alvain // *Recent 59 Developments in Computer Modeling of Powder Metallurgy Processes*.- 2000.- P. 29–41.
39. Singh A. Rheological behaviour of rock salt under uniaxial compression. / C. Kumar, L.G. Kannan, K.S. Rao // Paper presented at the *Procedia Engineering*.- 2017.- V. 173.- P. 639-646.
40. Chtourou H. Modeling of the metal powder compaction process using the cap model. Part I. Experimental material characterization and validation / H. Chtourou, M. Guillot, A. Gakwaya // *International Journal of Solids and Structures*.- 2002.- V. 39(4).- P. 1059–1075.
41. Chtourou H. Modeling of the metal powder compaction process using the cap model. Part II. Numerical implementation and practical applications / H.

Chtourou, M. Guillot, A. Gakwaya // International Journal of Solids and Structures.- 2002.- V. 39(4).- P. 1077–1096.

42. Агеенко В.А. Испытание мерзлых грунтов в условиях трехосного сжатия для определения реологических характеристик. / М.Н. Тавостин // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2018.- №5.- С. 122–128.

43. Баклашов И. В. Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т.- М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004.- Т.1. Основы геомеханики. 208 с.

44. Wang G. Experimental investigations of the creep-damage-rupture behaviour of rock salt. / L. Zhang, Y. Zhang, G. Ding // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.-2014.- V. 66.- P. 181-187.

45. Wang G. Creep properties of salt rock and its nonlinear constitutive model/ X. Liu, J. Guo, M. Huang // Meitan Xuebao. Journal of the China Coal Society.- 2014.- V. 39(3).- P. 445-451.

46. Yu Zhang Experimental investigation of creep behavior of clastic rock in xiangjiaba hydropower project / Xu Weiya, Shao Jian-fu, Zhao Hai-bin, Wang Wei // Water Science and Engineering.- 2015.- V. 8(1).- P. 55-62.

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

48. Ударцев А.А. Исследование ползучести соляных пород сатимольского месторождения борно-калийных солей / Бельтюков Н.Л. // Стратегия и процессы освоения георесурсов сб. науч. тр. Вып. 11 ГИ УрО РАН.- Пермь.- 2013.- 298 С.

49. Константинов С.А. Некоторые результаты испытаний образцов соляных пород на ползучесть / Ваулин И. Б., Ильинов М. Д. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал.- 2008.- №2.- С. 118-122.

50. Halwany Sam Applied soil mechanics with ABAQUS applications / Sam Helwany // Library of Congress Cataloging – Publication Data. Publishing Wiley.- 2007.

51. Скворцова З.Н. Влияние циклических нагрузок на ползучесть по механизму растворения–пересадения / Зубов Д.Н., Муралев А.Е., Траскин В.Ю. // Коллоидный журнал.- 2011.- Том 73.- №5.- С. 680-685.

52. Константинова С.А. Влияние геометрии образца на скорость кратковременной релаксации и ползучести сильвинита, карналлита и каменной соли / Аптуков В.Н., Мензляков А.Ф. // Вестник МГТУ им. Носова Г.И.- 2013.- №1.- С. 13-15.

53. Пестерин В.М. Ползучесть образцов каменной соли в опытах на сжатие / Пестерина И.В., Мерзляков А.Ф. // Пермь. «Известия вузов. Горный журнал».- № 1.- 2012.- С. 119-124.

54. Асанова В. А. Деформирование соляных пород при длительном нагружении / Панькова И.Л., Аникина В.В. // Горный институт УрО РАН. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.- 2011.- №4.- С. 50-56.

55. Асанов В.А. Изучение особенностей деформирования соляных пород при длительном нагружении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2010.- №1.- С. 105-110.

56. Кузьминых В.С. Особенности деформирования и разрушения соляных пород / Евсеев В.С. // Сборник проблем безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях. Горный институт УрО РАН.- 2014.- С. 304-311.

57. Паньков И.Л. Экспериментальное изучение деформирования соляных пород при ползучести / Ударцева А.А. // Геология и полезные ископаемые Западного Урала.- 2011.- №11.- С. 205-207.

58. Цаплев В.М. Ультразвуковой метод исследования ползучести поликристаллических горных пород / Иванюк Р.М., Зверевич В.В. // Санкт-Петербург. Записки Горного Института.- 2013.- С. 96-100.
59. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести // Учебник для вузов.- изд. 2-е.- перераб. и доп. М.- «Машиностроение».- 1975.- 400 с.
60. Ильинов М.Д. Ускоренный метод определения реологических свойств горных пород / Карташов Ю.М. // Санкт-Петербург. Записки Горного института.- 2011.- С. 207-209.
61. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии. // Государственный комитет по стандартам.- Постановление от 19.06.84 №1973.- Введен в действие 01.07.1986 г.
62. Гальперин А. М. Реологические расчёты горно-технических сооружений / Шафаренко Е.М // Москва.- Недра.- 1977.- 246 с.
63. Singh A., Kumar C., Gopi Kannan L., Seshagiri Rao K., Ayothiraman R. Engineering properties of rock salt and simplified closed-form deformation solution for circular opening in rock salt under the true triaxial stress state // Engineering Geology. 2018. V. 243. P. 218-230.
64. Mansouri H., Ajalloeian R. Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. V. 110. P. 19-27.
65. Зильбершмидт В.Г., Спиркова С.И., Титов Б.Г. Зависимость разрушения каменной соли от скорости деформирования//Изв. вузов. Горн. журн. 1987, №8, с.5-7.
66. Оксенкруг Е.С. Определение предела длительной прочности каменной соли в рассольной среде // Экспресс-информация. 1974, № 6, с. 18-19.

67. Оксенкруг Е.С., Шафаренко Е.М. Ползучесть и длительная прочность каменной соли//Основания, фундаменты и механика грунтов. 1974, №9, с.17-19.
68. Xu H., Qi L., Liu B., Bai, Z. Poyhting-thomson model of rock salt under cyclic loading // Journal of Vibration and Shock. 2018. V. 37. P. 203-209
69. Liu J., Wang Y., Xie K., Liu Y. Gas injection and brine discharge in rock salt gas storage studied via numerical simulation // PLoS ONE. 2018. V. 13. P. 230-235
70. Димитров И., Оксенкруг Е.С., Тавостин М.Н., Шафаренко Е.М. Реологические свойства различных литологических групп каменной соли//Проблемы механики грунтов и инженерного мерзлотоведения//Сб. науч. тр. ВНИИ оснований и подземных сооружений, НТБ Геотехника/Под ред. Ю.К. Зарецкого. М.: Стройиздат, 1990, с.72-75
71. Ержанов Ж.С., Сагинов А.С., Гуменюк Г.Н., Векслер Ю.А., Нестеров Г.А. Ползучесть осадочных горных пород. Теория и эксперимент. Изд-во «Наука» Каз. ССР, Алма-Ата, 1970, 208 с
72. Константинова С.А. Ползучесть образцов каменной соли в условиях сложного напряженного состояния//Горн. журн. 1986, № 8, с. 1-5.
73. 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 // Advanced Engineering Science. 2017. V. 49. P. 165-172
74. Singh A., Kumar C., Kannan L. G., Rao K. S., Ayothiraman R. Rheological behaviour of rock salt under uniaxial compression // Paper presented at the Procedia Engineering. 2017. V. 173. P. 639-646
75. Zhou Z., Liu J., Wu F., Wang L., Zhuo Y., Liu W., Li J. Experimental study on creep properties of salt rock and mudstone from bedded salt rock gas storage // Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition). 2016. V. 48. P. 100-106

76. Günther, R., Salzer K., Popp T., Lüdeling C. Steady-state creep of rock salt: Improved approaches for lab determination and modelling // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015. V. 48. P. 2603-2613
77. Rahimi S., Hosseini M. Laboratory studies of creep behavior on thick-walled hollow cylindrical salt rock specimens // *Arabian Journal of Geosciences*. 2015. V. 8. P. 5949-5957
78. Агеенко В.А. Исследование реологических свойств солевых пород // *Известия Уральского государственного горного университета*.- 2019.- Выпуск 1 (53).- С. 115-120.
79. Агеенко В.А., Скворцов А.А. Изучение реологических свойств каменной соли в условиях сверхдлительного одноосного нагружения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. -2019.- № 11.- С. 27-34.
80. 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.- pp. 18-22.
81. Yamamoto K., Kuwahara Y., Kato N., Hirasawa T. Deformation rate analysis: a new method for in situ stress estimation from inelastic deformation of rock samples under uni-axial compressions // *Tohoku Geoph. J. (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5)*, 1990, v.33, №2, pp.127-147
82. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. – Алма-Ата: Наука, 1964. – 176 с.
83. Баклашов И.В. Геомеханика: Учебник для вузов в 2 Т. Т. 1 Основы Геомеханики. – Москва: Изд-во Московского государственного горного университета, 2004. – 208 с.
84. Хлопцов В.Г. Оценка устойчивости подземных резервуаров//*Газовая промышленность*, 2002, N 2, С. 70-73.
85. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. // Государственный комитет по стандартам.- Постановление от 15.03.848 №546.- Введен в действие 15.03.1988 г.