

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

**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»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель – к.т.н. Скворцов А.А.**

Москва 2020

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Каменная соль является не только чрезвычайно важным полезным ископаемым, но и вмещающей геосредой 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 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 раздельно 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 трехосного 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 трехосном 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* анализируется современное состояние методов изучения реологических свойств каменной соли, необходимых для проектирования, строительства и эксплуатации ПХ, особое внимание уделено состоянию изученности метода ступенчатого нагружения каменной соли. На основе этого анализа сформулирована указанная выше цель диссертационного исследования, а так же необходимые задачи для обоснования методических подходов к реализации экспериментального определения реологических свойств с использованием ступенчатого нагружения:

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, полученных по результатам испытаний прямым и ступенчатым методом.

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

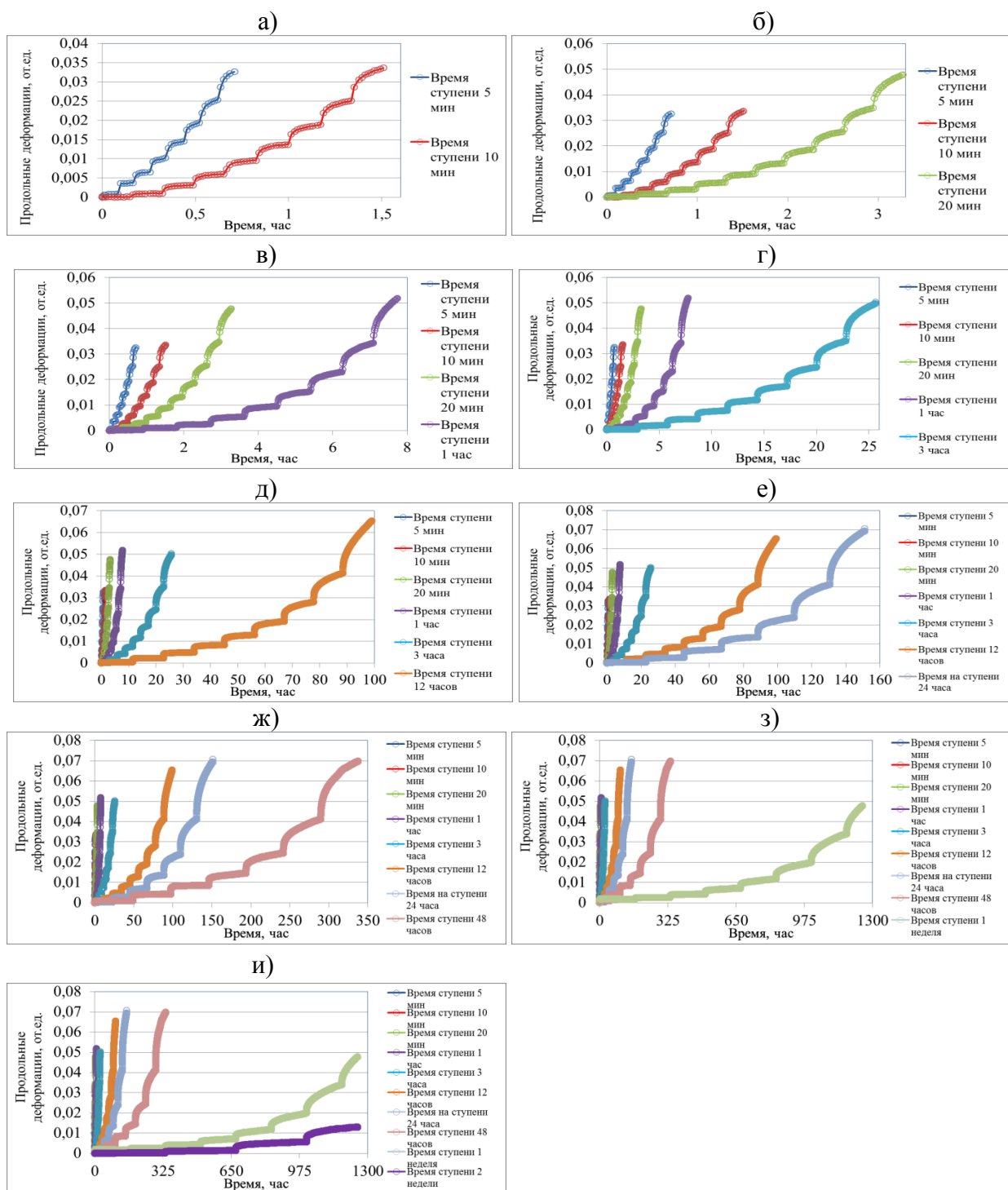
*Вторая глава* посвящена экспериментальным исследованиям по определению реологических характеристик каменной соли прямым методом и методом ступенчатого нагружения.

В связи с необходимостью обоснования времени выдержки постоянной нагрузки на каждой ступени были проведены эксперименты с постоянной величиной ступени  $\sigma_n = 3$  МПа. 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 постоянной на протяжении времени  $t$ . Таким образом, процедура повторялась до разрушения образца каменной соли. Согласно выбранному режиму испытаний, на следующем образце о величина времени ступени  $t$  изменялась и была выбрана автором с учетом максимально возможного количества проведения экспериментов и времени, затраченного на эксперименты. В таблице 1 приведены значения времени  $t$  и шаг увеличения напряжения  $\sigma_n$  проведенных экспериментов.

**Таблица 1** – Условия проведения ступенчатого нагружения

| Шаг увеличения напряжения на ступени $\sigma_n$ , 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)                                                    |

Таким образом, по полученным значениям были построены графики изменения продольных деформаций  $\varepsilon_1$  от времени  $t$  для всех проведенных испытаний. На рисунке 1 представлены достоверные сведения о результатах экспериментов. Часть экспериментов была отбракована по причинам расхождения данных при одних и тех же параметрах испытания.



**Рисунок 1** – Графики изменения продольных деформаций  $\varepsilon_1$  во времени  $t$  образцов каменной соли при идентичных величинах создаваемых напряжений  $\sigma_1$ . а)  $t = 5$  мин, 10 мин; 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

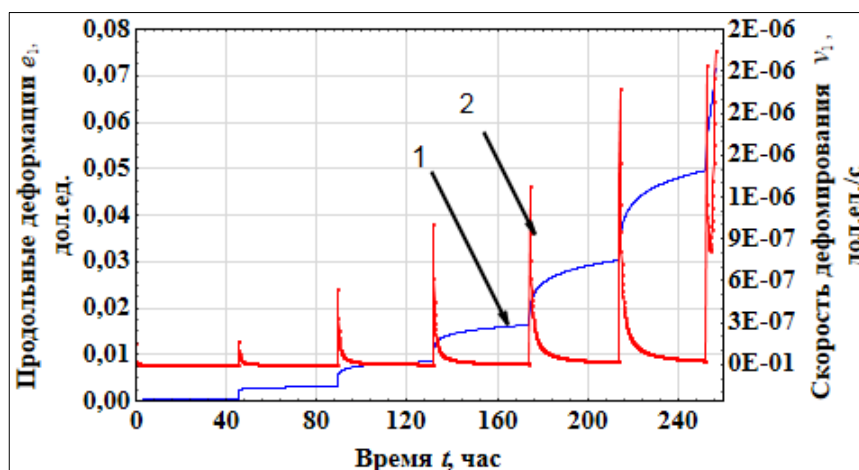
Данные, полученные в ходе экспериментов, обрабатывались, затем производилось количественное и качественное сравнение полученных скоростей деформирования. Скорость деформирования рассчитывалась по формуле:

$$v_n = \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}}{t}, \text{ дол. ед./с} \quad (1)$$

где  $\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}$  – значения деформации, накопленные за время  $t$ , дол. ед.;

$t$  – время, соответствующее интервалу записи данных в ходе эксперимента.

На рисунке 2 представлен график скоростей деформирования  $v_n$  для эксперимента с временем  $t$  постоянной нагрузки  $\sigma_1$  на ступени, равным 48 часам. Кроме того, дополнительным критерием перехода на следующую ступень было достижение значения скорости деформирования  $1,0 \cdot 10^{-11}$  дол.ед./с.



**Рисунок 2** – График зависимости продольных деформаций  $e_1$  (1) и скорости продольного деформирования  $v_1$  (2) от времени  $t$

Особо стоит отметить, что на каждой ступени скорости продольного деформирования постоянно уменьшаются в том случае, если не происходит разрушение образца. При напряжении 28 МПа скорость продольного деформирования начала уменьшаться, а в дальнейшем снова начала возрастать. Отдельного внимания требует тот факт, что прогнозирование процесса деформирования на участке, где образец перешел в стадию прогрессирующей ползучести и скорость  $v$  начала возрастать, является сложным процессом. 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 экспериментах, реализующих условия, приведенные в таблице 1, производилось определение скоростей продольного деформирования на конечном участке кривой ползучести каждой ступени; данному участку соответствовали минимальные значения скоростей. Результаты этих измерений приведены в таблице 2.

Для выявления времени, при котором скорость деформирования выходит на постоянную минимальную величину, были проведены эксперименты со временем на ступенях, равным 68 часам. На одной ступени время было сокращено до 19 часов. График изменения скорости продольного деформирования  $v_1$  представлен на рисунке 3.



**Рисунок 3** – Графическая зависимость скорости продольного деформирования образца от напряжения

Полученные результаты подтверждают тот факт, что определение скорости продольного 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 со сравнением со скоростью, полученной в экспериментах, проведенных прямым методом. Результаты определения скоростей деформирования при различном времени выдержки постоянного напряжения на ступени представлены в таблице 2. В таблице 3 приведены результаты определения скорости деформирования при проведении реологических испытаний прямым методом. Время эксперимента прямым методом составляло 300 часов. Скорость продольного деформирования определялись при одинаковых напряжениях в режиме ступенчатого нагружения и в испытаниях, проведенных прямым методом.

**Таблица 2 – Скорости деформирования на ступенях с разным временем выдержки постоянного напряжения**

| Напряжение $\sigma_1$ , МПа | $v_1$ , дол.ед./с, при времени выдержки постоянного напряжения: |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                       |                       |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                             | 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 3 - Скорости деформирования образцов, испытанных прямым методом**

| Напряжение $\sigma_1$ , МПа | Время проведения эксперимента $t$ , час | $v_1$ , 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 свидетельствуют о том, что установившаяся скорость изменяется в интервале от  $10^{-8}$  до  $10^{-10}$  дол. ед./с в зависимости от величины напряжения, при котором проходил 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 выдержки на ступени от 5 мин до 48 часов скорость изменяется в интервале от  $10^{-6}$  до  $10^{-8}$  дол. ед./с. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что проводить эксперименты с величиной ступени меньше 48 часов некорректно, так как при таких условиях значение скорости деформирования оказывается значительно выше скоростей, полученных в результате экспериментов, проведенных прямым методом.

В связи с необходимостью выбора величины ступени нагружения были проведены эксперименты со ступенями нагрузки  $\Delta\sigma = 0,5$  МПа  $\Delta\sigma = 3$  МПа. при этом 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.

Отмечаем, что 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  $\sigma_1$ . Указанные особенности деформирования представлены на рисунке 4.

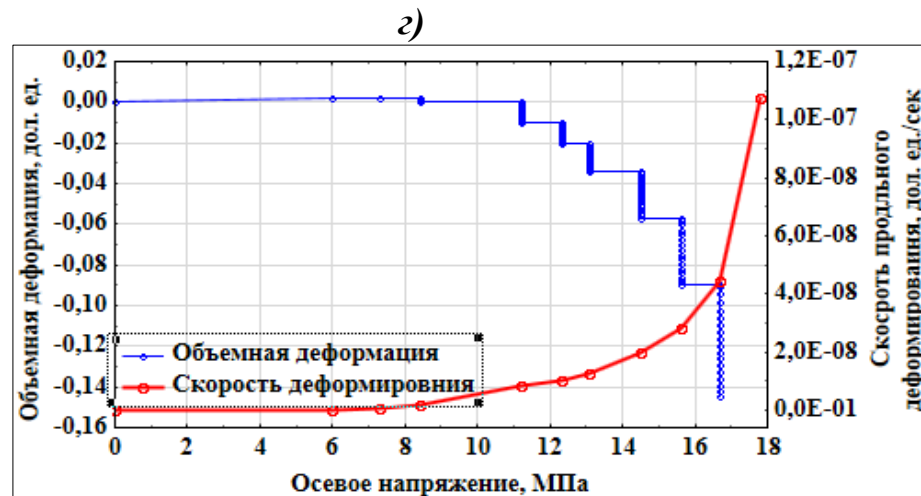
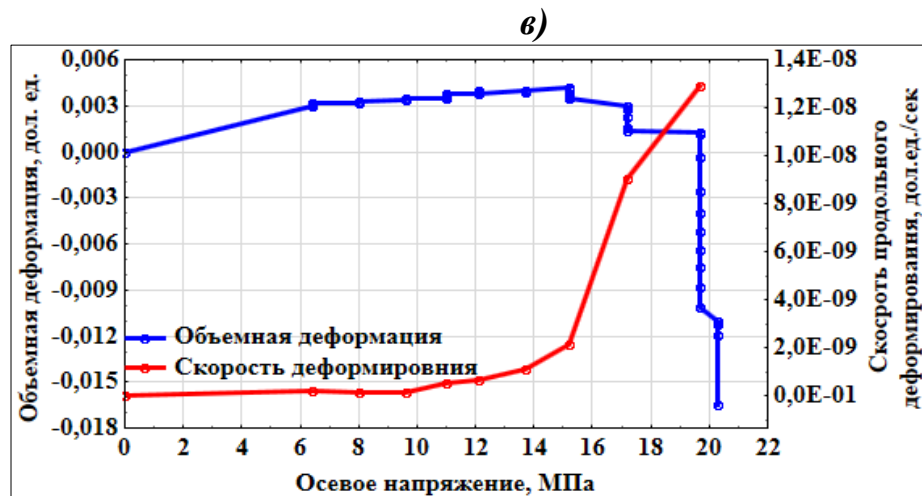
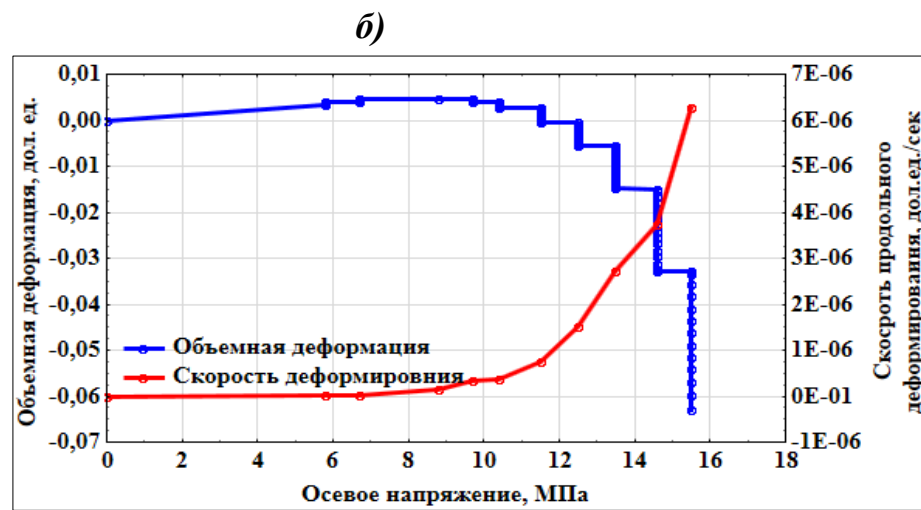
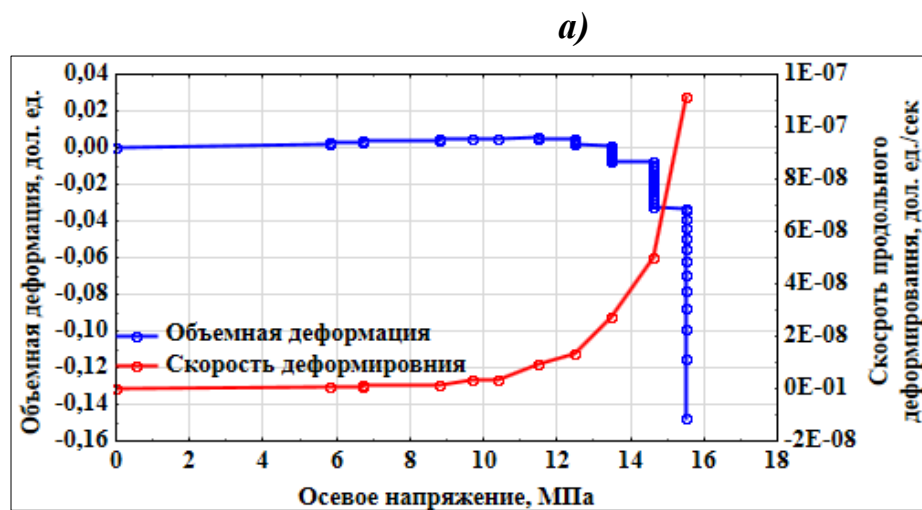
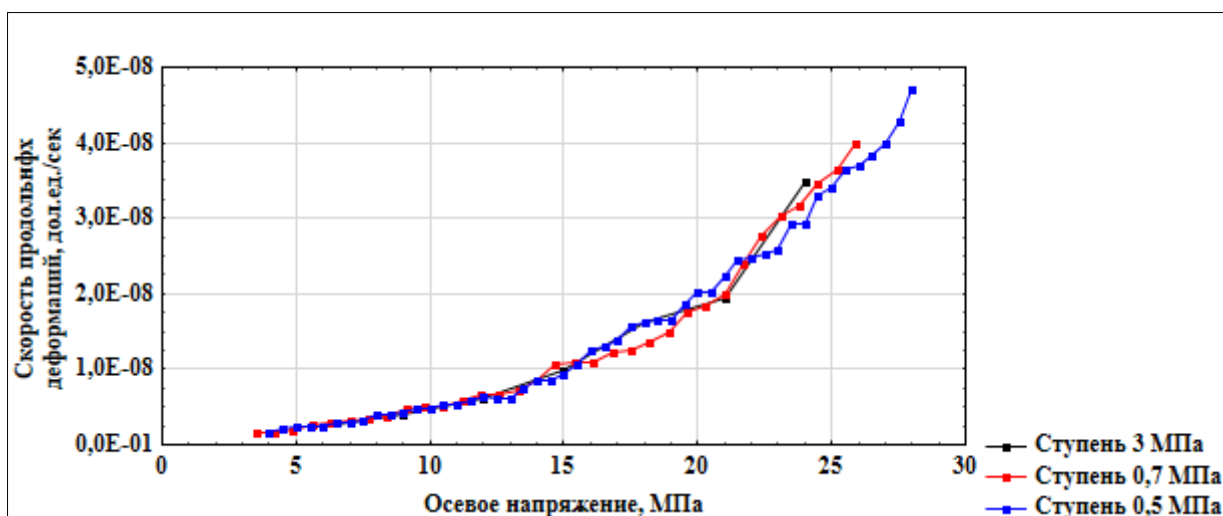


Рисунок 4 – Графики зависимости скорости продольного деформирования  $v_1$  образца и его объемных деформаций  $e_v$  от осевого напряжения  $\sigma_1$

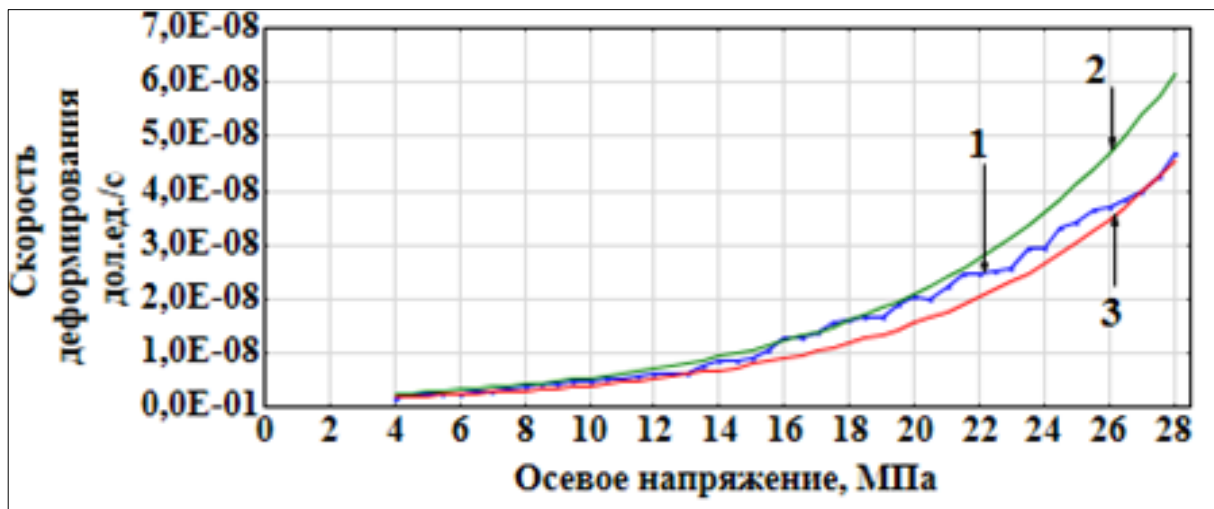
Качественный анализ графиков показал, что с точки зрения практического применения и дальнейшего повышения информативности экспериментальных данных следует понимать, что степень нагрузки не должна превышать 40-50% от прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$ . Таким образом, величины напряжения ступеней будут попадать в интервалы до и после резкого увеличения скорости деформирования и перехода образца в стадию разуплотнения. Данное напряжение соответствует пределу длительной прочности образца. Это подтверждается результатами определения предела длительной прочности методом объемных деформаций при быстром нагружении. Далее был проведен анализ изменения скорости продольной деформации от напряженного состояния при разной величине шага увеличения ступени. На рисунке 5 представлены зависимости изменения скорости продольного деформирования ( $v_1$ ) от осевого напряжения  $\sigma_1$  с временем ( $t$ ) на каждой ступени, равным 48 часам и шагом ступени 3 МПа, 0,7 МПа и 0,5 МПа.



**Рисунок 5** – Графические зависимости изменения скоростей продольного деформирования  $v_1$  от осевого напряжения  $\sigma_1$  образцов, испытанных 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

Результаты определения показали, что шаг величины ступени нагружения незначительно влияет на зависимость изменения скорости продольного деформирования  $v_1$  от напряженного состояния. Этот факт позволяет рассматривать кривую скорости продольного деформирования  $v_1$  от осевого напряжения  $\sigma_1$ , полученную в результате обработки

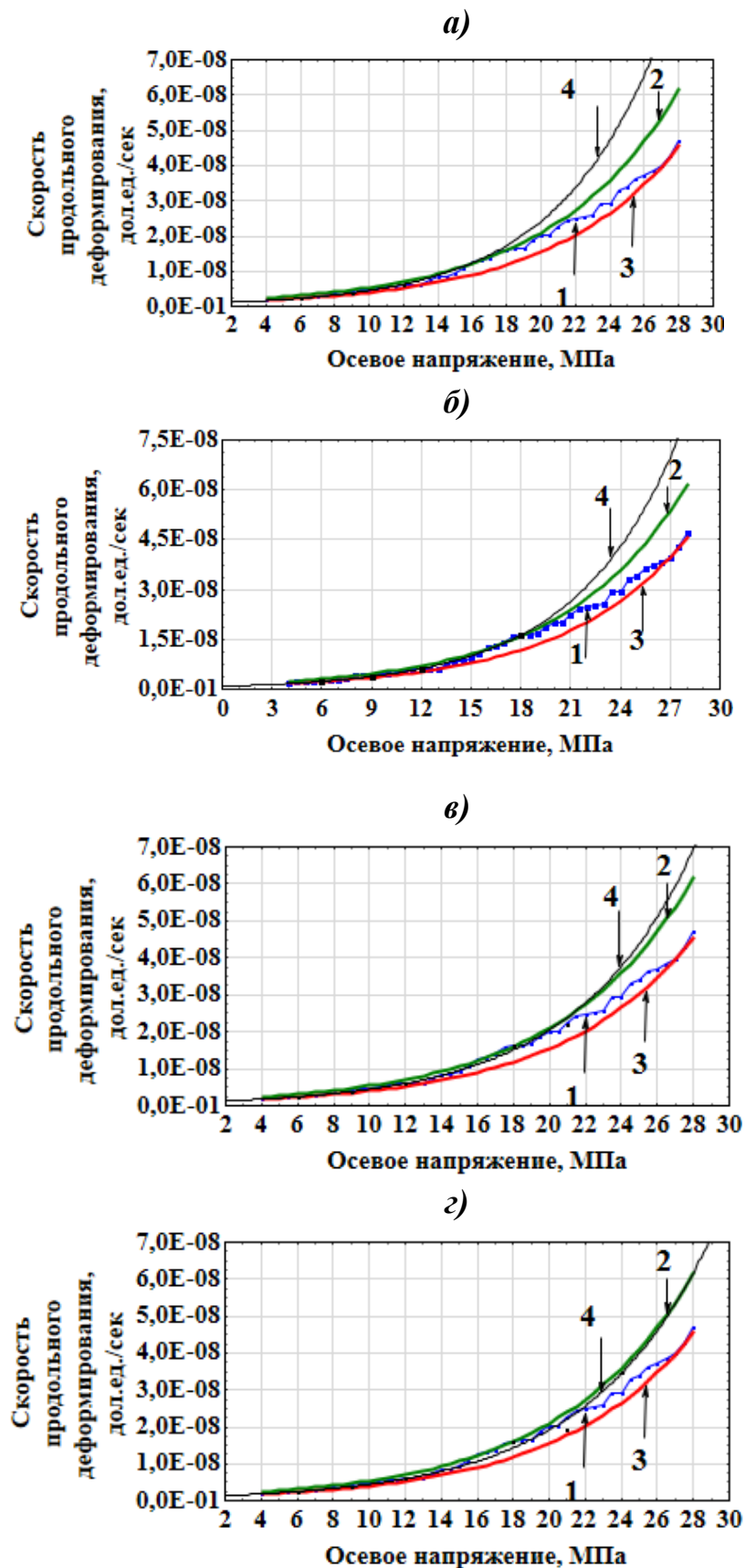
экспериментальных данных с наибольшим количеством ступеней, как базисную. Базисную кривую опишем выражением  $f(v_1) = a_1 \cdot \exp^{a_2}$  и установим доверительный интервал 15%.



**Рисунок 6** – Графическое отображение доверительного интервала базисной кривой и экспериментальных данных (1- экспериментальные данные скорости продольного деформирования  $v_1$  от осевого напряжения  $\sigma_1$ ; 2 – верхняя граница доверительного интервала базисной кривой; 3 - нижняя граница доверительного интервала базисной кривой)

Полученные зависимости следует интерпретировать следующим образом: в том случае, если провести эксперименты в режиме ступенчатого одноосного нагружения с различными величинами ступенчатого нагружения, и при этом расчётные значения будут лежать между линиями 3 и 2, то с погрешностью 15% можно утверждать, что зависимость определена верно.

Суть проведенных экспериментов с количеством ступеней меньшим, чем у базисной кривой, сводится к следующему. Необходимо оценить, какое количество ступеней достаточно для того, чтобы данные соответствовали базисной кривой с погрешностью не более 15%. В связи с этим необходимо описать выражением  $f(v_1) = a_1 \cdot \exp^{a_2}$  зависимости, полученные в результате экспериментов с количеством ступеней, равным 7 (шаг ступени в этом эксперименте составлял  $\Delta\sigma=3$  МПа). Изначально для расчёта было выбрано 3 точки зависимости скорости продольного деформирования от напряжения. В случае непопадания графика функции в доверительный интервал в расчёт добавлялось еще одно значение зависимости скорости продольного деформирования от напряжения. Процедура повторялась до того момента, когда график функции попал в доверительный интервал. На рисунке 7 представлены результаты проведенных расчётов.



**Рисунок 7** – Графические зависимости результатов расчёта скорости деформирования  $v_1$  от осевого напряжения  $\sigma_1$ . (1 – данные эксперимента; 2 – верхняя граница доверительного интервала; 3 – нижняя граница доверительного интервала; 4 – зависимость рассчитанная по 3-м точкам (а), по 4-м точкам (б), по 5-ти точкам (в) и по 6-ти точкам (г))

Анализ результатов, приведенных на рисунке 7, свидетельствует о возможности с погрешностью 15% определить зависимость скорости продольного деформирования  $v_1$  от осевого напряжения  $\sigma_1$  в результате экспериментов в режиме одноосного ступенчатого нагружения с временем выдержки на каждой ступени не менее 48 часов и количеством ступеней не менее 6-ти.

**Третья глава** посвящена исследованиям в условиях 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.

Для анализа данных, полученных в ходе экспериментов, был выбран степенной закон ползучести:

$$\dot{\varepsilon}_i = A \cdot (\sigma_i)^n \cdot t^m \quad (2)$$

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

Зависимость интенсивности напряжений от главных напряжений, входящая в уравнение степенного закона ползучести (2), определяется:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_1$  – осевое напряжение, МПа;

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

Выражение для расчёта интенсивности деформаций от главных линейных деформаций:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (4)$$

Определение объемного напряжения  $\sigma_v$  действующего в массиве производилось по методике, предложенной А.М. Гальпериным и Е.М. Шафаренко:

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

где  $\rho$  – средняя плотность вышележащих горных пород, кг/м<sup>3</sup>;

$h$  – глубина отбора кернового материала, м;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

**Таблица 4** – Напряженные состояния, воспроизведенные в экспериментах

| Сумма главных напряжений $\sigma_v$ , МПа | Осевое напряжение $\sigma_1$ , 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                                              |

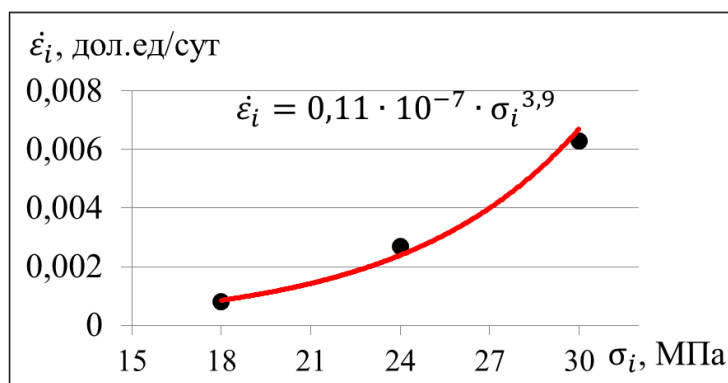
На расчётных кривых интенсивности деформаций, рассчитанных по выражению (3), выделялись участки, приближенные к прямолинейным. Скорость интенсивности деформирования на прямолинейных участках кривой постоянная. В связи с этим, к выделенным участкам проводились касательные прямые на конечном участке деформирования, где участок кривой приближен к прямолинейному. Скорость интенсивности деформаций определялась как тангенс угла наклона проведенной касательной. Результаты представлены в таблице 5.

**Таблица 5** – Результаты расчёта интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , интенсивности деформаций  $\dot{\epsilon}_i$  и скорости интенсивности деформаций  $\dot{\epsilon}_i$ 

| $\sigma_1=30$ МПа,<br>$\sigma_3=12$ МПа |                                    | $\sigma_1=34$ МПа,<br>$\sigma_3=10$ МПа |                                    | $\sigma_1=38$ МПа,<br>$\sigma_3=8$ МПа |                                    |
|-----------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|
| $\sigma_i$ , МПа                        | $\dot{\epsilon}_i$ ,<br>дол.ед/сут | $\sigma_i$ , МПа                        | $\dot{\epsilon}_i$ ,<br>дол.ед/сут | $\sigma_i$ , МПа                       | $\dot{\epsilon}_i$ ,<br>дол.ед/сут |
| 18,0                                    | 0,0008                             | 24,0                                    | 0,0027                             | 30,0                                   | 0,0063                             |

По результатам проведённых расчётов построен график зависимости  $\sigma_i$  от  $\dot{\epsilon}_i$ , аппроксимированный зависимо:

$$\dot{\epsilon}_i = B \cdot (\sigma_i)^n \quad (6)$$

**Рисунок 8**– График зависимости скорости интенсивности деформирования  $\dot{\epsilon}_i$  от интенсивности напряжений  $\sigma_i$

В связи с необходимостью аппроксимации экспериментальных кривых длительного деформирования, выражение (2) интегрировалось по времени, и экспериментальные кривые аппроксимировались полученным результатом с целью определения коэффициентов  $A$  и  $n$ .

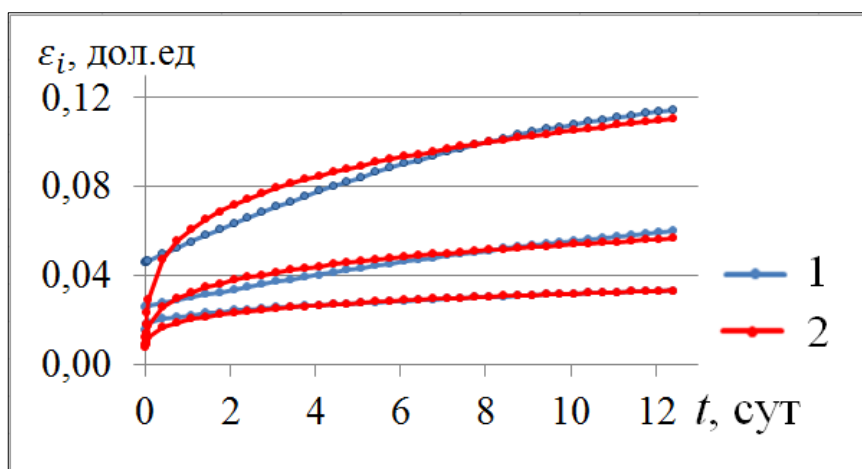
$$\varepsilon_i = A \cdot (\sigma_i)^n \cdot \frac{t^{m+1}}{m+1} \quad (7)$$

В результате произведенных расчётов были определены коэффициенты степенного закона ползучести, представленные в таблице 6:

**Таблица 6** – Расчетные значения коэффициентов степенного закона ползучести (7)

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

По полученным данным были построены графики, рассчитанные по выражению (2), представленные на рисунке 9.

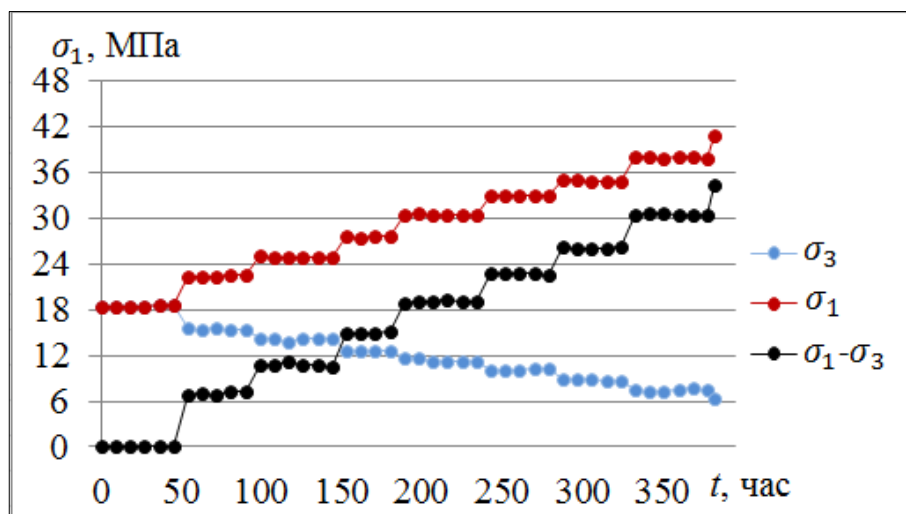


**Рисунок 9** – Графики зависимостей интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  от времени  $t$  экспериментальных (1) и расчётных (2) данных, полученных по выражению (2).

Как видно из рисунка 9, 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

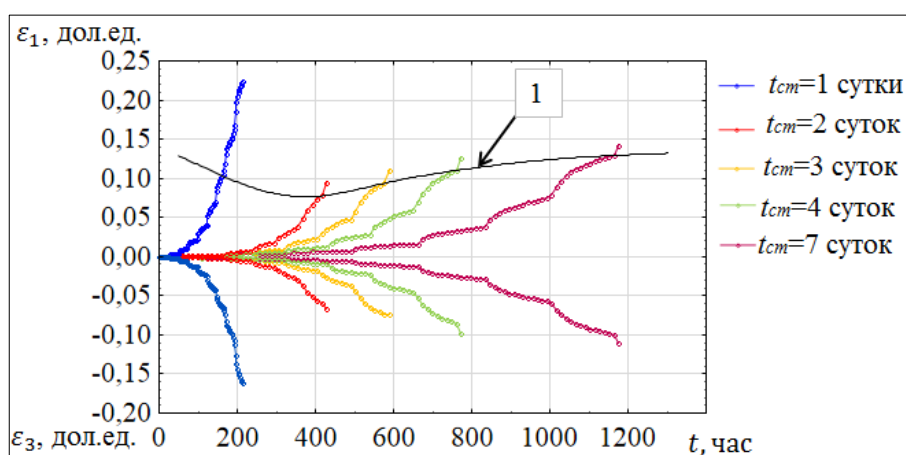
нагружения. Схема нагружения образцов при проведении эксперимента методом ступенчатого нагружения представлена на рисунке 10.



**Рисунок 10** – Схема нагружения образца каменной соли при испытаниях методом ступенчатого нагружения

В качестве изменяемого параметра выступало время  $t$  выдержки напряжения на каждой ступени нагружения. Величины времени выдержки на ступенях были приняты равными 1, 2, 3, 4 и 7 суток.

Далее оценивалось изменение конечных деформаций разрушения в зависимости от времени выдержки на ступени. Характер их изменения будет повторяться и при других напряжениях. Оценка производилась с целью определения минимального времени, при котором успевает произойти перераспределение напряжений в образце.



**Рисунок 11**– Графики зависимости продольных  $\varepsilon_1$  и поперечных  $\varepsilon_3$  деформаций от времени  $t$ .  $t_{cm}$  – время выдержки на ступени. 1 – линия соединяющая величины деформаций при одинаковом напряжении  $\sigma_1 = 36$  МПа,  $\sigma_3 = 9$  МПа.

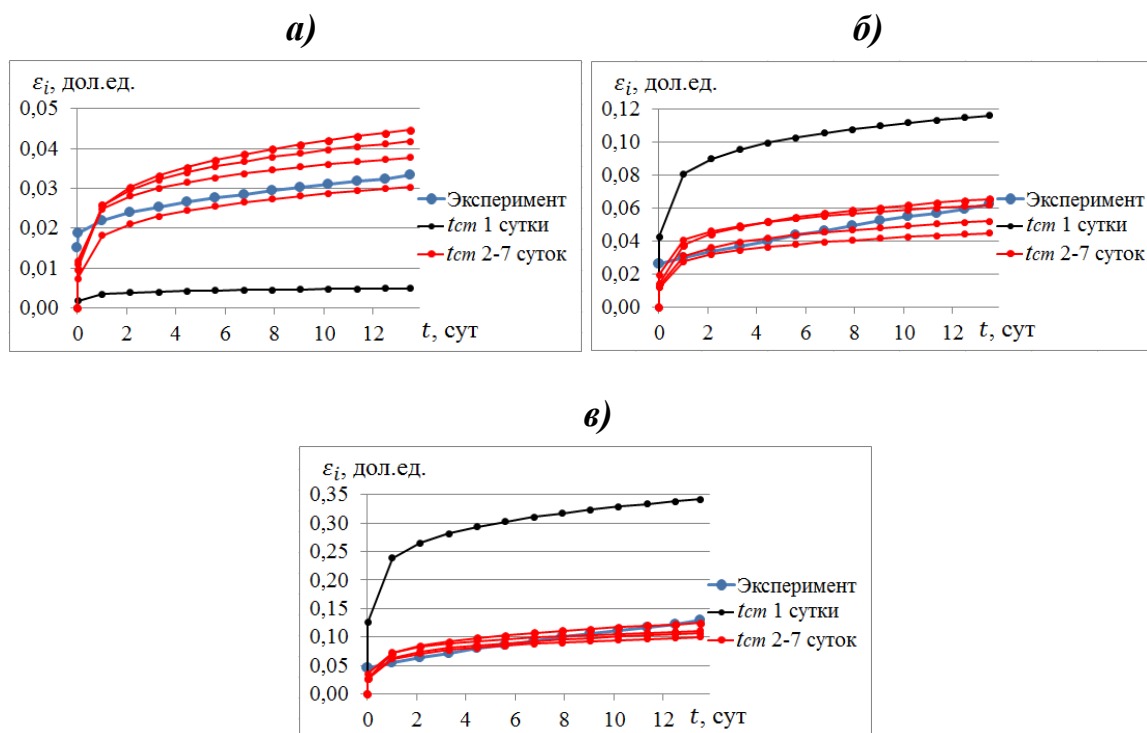
Качественный анализ графика показывает, что на линии 1, соединяющая величины деформаций при одних и тех же напряжениях для разных экспериментов, можно выделить 3 участка. На первом участке, когда время выдержки постоянного напряжения на ступени менее 2 суток, линия имеет ниспадающий характер. На этом участке новая ступень нагрузки вызывает быстрый рост деформаций. При увеличении времени ступени свыше 2 суток, соединяющая кривая 1 на рисунке 11 выполаживается. Далее отчетливо выражен третий участок. При увеличении времени выдержки на ступени, деформации растут за счёт ранее накопленных деформаций на предыдущих ступенях деформирования и линия на данном участке имеет возрастающий характер. Это позволяет говорить о том, что в том случае, когда время выдержки постоянного напряжения на ступени меньше времени, за которое скорость деформирования приближается к постоянному значению, величины деформаций имеют большие значения, чем при времени, за которое скорость успевает приблизиться к постоянному значению, при одном и том же уровне напряжений.

Дальнейшие исследования были направлены на определение параметров степенного закона ползучести для экспериментов, проводимых в режиме ступенчатого нагружения по аналогии с определением при проведении прямым методом. Проводился анализ данных, полученных в разных режимах нагружения. Итоговые результаты представлены в таблице 7.

**Таблица 7** – коэффициенты степенного закона ползучести для экспериментов, проводимых в режиме ступенчатого нагружения и прямым методом

| Метод ступенчатого нагружения |                                                  |        |      |                      |        |      |                      |        |      |                      |        |      |                      |        |      |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|--------|------|----------------------|--------|------|----------------------|--------|------|----------------------|--------|------|----------------------|--------|------|
| $\sigma_i$ , МПа              | Время выдержки постоянного напряжения на ступени |        |      |                      |        |      |                      |        |      |                      |        |      |                      |        |      |
|                               | 1 сутки                                          |        |      | 2 суток              |        |      | 3 суток              |        |      | 4 суток              |        |      | 7 суток              |        |      |
|                               | $A$                                              | $m$    | $n$  | $A$                  | $m$    | $n$  | $A$                  | $m$    | $n$  | $A$                  | $m$    | $n$  | $A$                  | $m$    | $n$  |
| 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                  |                                                  |        |      |                      |        |      |                      |        |      |                      |        |      |                      |        |      |
|                               | $A$                                              |        |      | $m$                  |        |      | $n$                  |        |      |                      |        |      |                      |        |      |
| 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                  |        |      |                      |        |      |                      |        |      |

Зависимости, полученные в ходе экспериментов, проводимых прямым методом, были описаны уравнением 2. Коэффициенты уравнения определялись в результате обработки экспериментов, проведенных методом ступенчатого нагружения при времени выдержки постоянного напряжения на ступени согласно таблице 7.



**Рисунок 12** – Графики зависимости экспериментальных данных интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  от времени  $t$  и расчётных данных, по результатам определением 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 12 видно, что прогнозные зависимости интенсивности деформаций от времени, рассчитанные по результатам экспериментов проводимых методом ступенчатого нагружения, со временем выдержки постоянного напряжения на ступени свыше 2 суток, согласуются с данными, проводимыми прямым методом.

**Четвертая глава** посвящена описанию методического подхода к проведению экспериментов в режиме ступенчатого нагружения в условиях одноосного и трёхосного напряженного состояния. Предлагаемая методика устанавливает параметры величин напряжения на ступенях и времени выдержки постоянного напряжения при лабораторном определении

реологических характеристик каменной соли в режимах ступенчатого нагружения. 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. Разработанная методика описывает процедуру проведения экспериментов как в одноосном, так и в трехосном напряженном состоянии. Приведены рекомендации по оформлению результатов проводимых экспериментов в режиме ступенчатого нагружения. Методика принята к использованию в ООО «Газпром геотехнологии».

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации, представляющей собой законченную 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 получено выражение 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.

**Основные положения диссертации изложены в следующих опубликованных работах:**

1. Агеенко В.А. Исследование реологических свойств каменной соли // Известия Уральского государственного горного университета.- 2019.- Выпуск 1 (53).- С. 115-120.

2. 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.

3. 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.

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

5. Агеенко В.А. Экспериментальное определение физико-механических свойств галогенных пород как основание для проектирования подземных хранилищ углеводородов в соляных формациях. // VII Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность». Сборник тезисов.- М.: Газпром ВНИИГАЗ.- 2018. –С.18.