

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

На правах рукописи

Кравченко Олег Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА АКУСТИКО-
ЭМИССИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ
МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КАМЕННОЙ СОЛИ**

**Специальность 25.00.16 - «Горнопромышленная и
нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и
геометрия недр»**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Шкуратник Владимир Лазаревич**

Москва, 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ И СОСТОЯНИЯ СОЛЯНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА (ПХГ)	8
1.1 Подземные хранилища газа в соляных отложениях, особенности их строительства и эксплуатации	8
1.2 Базовая информация о свойствах и напряженно-деформированном состоянии каменной соли, используемая при проектировании, строительстве и эксплуатации ПХГ.....	15
1.3 Прямые методы и результаты изучения физико-механических свойств каменной соли на образцах	19
1.4 Современное состояние и результаты акустико-эмиссионных исследований свойств и состояния каменной соли на образцах	24
1.5 Влияние температурных воздействий на физико-механические свойства каменной соли.....	28
Выводы и постановка задач исследований.....	33
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ КАМЕННОЙ СОЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ	36
2.1 Вещественный состав и структурно-текстурные особенности соляных пород	37
2.2 Закономерности акустической эмиссии каменной соли при различных скоростях одноосного деформирования и температурных воздействиях	38
2.3 Закономерности акустической эмиссии, продольных и объемных деформаций каменной соли при её нагружении по схеме Кармана и температурных воздействиях.....	55
Выводы к главе 2:.....	65
ГЛАВА 3. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ КАМЕННОЙ СОЛИ В УСЛОВИЯХ	

ОДНООСНОГО И ТРЁХОСНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И СТУПЕНЧАТО ВОЗРАСТАЮЩЕГО ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ .	67
3.1 Акустико-эмиссионные и деформационные характеристики образцов каменной соли в условиях одноосного напряженного состояния и ступенчато возрастающего термического воздействия	67
3.2 Акустико-эмиссионные и деформационные характеристики образцов каменной соли в условиях сложноподпряженного состояния и ступенчато возрастающего термического воздействия.....	82
Выводы к главе 3:.....	91
ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ОБРАЗЦОВ КАМЕННОЙ СОЛИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ.....	93
4.1 Влияние температурных воздействий на проявления акустико- эмиссионного эффекта памяти образцов каменной соли при их циклическом одноосном нагружении с возрастающим от цикла к циклу максимальным уровнем напряжения	93
4.2 Проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти каменной соли при её одноосном циклическом нагружении с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле в условиях изменяющегося температурного воздействия	108
Выводы к главе 4:.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Каменная соль является уникальным геоматериалом, для которого характерны высокие прочность и пластичность, низкие проницаемость и пористость. Она легко растворяется и проявляет ярко выраженные реологические свойства. Это обуславливает перспективность создания в отложениях каменной соли искусственных резервуаров - подземных хранилищ газа (ПХГ), герметичность которых исключает миграцию хранимого продукта в окружающий массив. Для ПХГ характерны значительная глубина заложения, сложная форма, чрезвычайно большие объёмы, отсутствие крепления, значительные сроки эксплуатации, повышенные требования к длительной устойчивости, возможности управления которой в процессе эксплуатации хранилища ограничены. Поэтому устойчивость ПХГ обеспечивается, главным образом, за счёт использования на стадии его строительства соответствующих проектных решений, принимаемых на основе информации о механических свойствах и состоянии вмещающей геологической среды. В последние годы возрос интерес к получению указанной информации на основе акустико-эмиссионных (АЭ) исследований механически нагружаемых образцов. Однако, до настоящего времени такие исследования проводились без учёта реальных термобарических условий в зоне залегания ПХГ, которые способны существенно повлиять на все свойства соляных пород и динамику их повреждённости при деформировании, а значит и характеристики АЭ. Так известно, что температуры массива в зоне размещения ПХГ могут достигать 70°С и более. В связи с этим, актуальной является задача установления закономерностей влияния температурных воздействий на параметры АЭ при различных режимах механического нагружения каменной соли для последующей оценки её свойств и состояния на основе акустико-эмиссионных измерений.

Целью работы является установление закономерностей АЭ при различных режимах термобарических испытаний каменной соли во взаимосвязи с её физико-механическими свойствами и напряжённо-деформированным

состоянием, обоснование возможности использования этих закономерностей для решения задач геоконтроля при строительстве ПХГ.

Идея работы заключается в использовании акустико-эмиссионных эффектов, возникающих при различных режимах термобарического нагружения каменной соли, для оценки её физико-механических свойств и напряжённо-деформированного состояния.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Скорость одноосного деформирования и температура образцов каменной соли, наряду с их индивидуальными структурными особенностями, оказывают существенное влияние на активность возникающей на каждой стадии деформирования АЭ. При переходе через границы указанных стадий активность АЭ меняется не монотонно, проявляя характерные особенности, позволяющие надежно идентифицировать каждую из стадий, и оценивать значения пределов упругости и длительной прочности относительно прочности образца на одноосное сжатие.

2. При испытании образцов каменной соли по схеме Кармана и различных температурах активность АЭ, как и при одноосном нагружении, испытывает на границах между стадиями деформирования аномальные изменения. Однако в пределах каждой стадии активность АЭ носит более упорядоченный характер без существенных аномальных выбросов. Это позволяет на основе АЭ измерений более четко выделять указанные границы и оценивать по ним значения пределов упругости и длительной прочности относительно девиатора напряжений.

3. Температурные воздействия оказывают существенное влияние на процессы деформирования образцов каменной соли в условиях их одноосного статического нагружения, играя роль спускового механизма перехода от стадии устойчивой к стадии прогрессирующей ползучести. Момент такого перехода может быть идентифицирован по почти двукратному скачкообразному, и последующему экспоненциальному возрастанию активности АЭ.

4. Акустико-эмиссионный (АЭ) эффект памяти (ЭП) в каменной соли устойчиво проявляется при высоких (вплоть до 80°C) температурах. Память

сохраняется при переходе от низких к высоким температурам, то есть, АЭ первого цикла нагружения при высокой температуре позволяет восстановить значение максимального напряжения предшествующего цикла при низкой температуре. В случае, когда предшествующий цикл нагружения осуществлялся при высокой температуре, а последующий - при низкой, память не сохраняется. Аналогичные закономерности проявления памяти, но при меньшем показателе её сохранности, имеют место в условиях постоянства максимальных значений напряжений в последовательных циклах.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: корректной постановкой задач исследования; соответствием экспериментальных и предсказываемых теоретическими моделями закономерностей АЭ при деформировании пластичных геоматериалов; представительным объёмом экспериментальных исследований, проведённых с использованием средств измерений с высокими метрологическими характеристиками; непротиворечивостью данных деформационных и АЭ измерений; удовлетворительной сходимостью и воспроизводимостью результатов многократных АЭ измерений на прошедших цензурирование образцах.

Методы исследований включают: анализ и обобщение научно-технической информации по рассматриваемой проблеме; цензурирование исследуемой выборки образцов каменной соли; проведение синхронных деформационных и АЭ измерений на образцах каменной соли различных месторождений и при различных режимах их термобарического нагружения; теоретический анализ и обобщение полученных экспериментальных результатов.

Научная новизна исследований заключается:

- в установлении закономерностей активности АЭ на различных стадиях одноосного и трёхосного деформирования каменной соли и границах между этими стадиями в функции от температурных воздействий, выявлении влияния последних на смещение указанных границ и оцениваемые по ним свойства геоматериала;

- в установлении закономерностей изменения активности АЭ в условиях одноосного механического и термического нагружения каменной соли при переходе от стадии устойчивой к стадии прогрессирующей ползучести;

- в установлении особенностей проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в каменной соли при её циклическом нагружении с возрастающим и постоянным уровнем максимальной нагрузки в условиях высоких температур, а также прямого и обратного перехода между низкими и высокими температурами.

Практическая значимость и реализация результатов. Полученные в рамках диссертационной работы результаты исследований, отражающие закономерности влияния температурных воздействий на акустико-эмиссионные эффекты в каменной соли при различных режимах её механического нагружения, переданы в ООО «Газпром геотехнологии», которым используются для определения свойств и состояния соляных горных пород при проектировании Калининградского, Волгоградского и Новомосковского 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 8 научных работ, в том числе 5 – в журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, из которых 3 индексируются в базах данных WoS и Scopus и 2 – в Scopus.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 123 источников, содержит 52 рисунка и 9 таблиц.

Глава 1. Современное состояние акустико-эмиссионного метода изучения свойств и состояния соляных горных пород применительно к задачам проектирования, строительства и эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ)

1.1 Подземные хранилища газа в соляных отложениях, особенности их строительства и эксплуатации

Месторождения, мощности по переработке и потребители углеводородов расположены на территории нашей страны неравномерно и зачастую на значительных расстояниях друг от друга, а сама потребность в углеводородах существенно изменяется во времени в зависимости от климатических и сезонных факторов. Для минимизации связанных с этим рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в энергетической сфере, необходимо резервирование газо-нефтепродуктов на местах. При наличии соответствующих горно-геологических условий для решений этой задачи наиболее перспективно использование экономически, экологически и технологически безопасных подземных хранилищ жидких углеводородов и газа [1].

Подземные хранилища углеводородов сооружают в различных геологических средах. В качестве вмещающего массива могут выступать как пористые породы, так и непроницаемые горные породы. Для создания последних часто используют отложения каменной соли, в которых методом выщелачивания создают подземных хранилища. Также в последнее время для захоронения отходов бурения создают подземные хранилища в многолетнемерзлых породах [3].

В принципе подземные хранилища могут иметь самое разное назначение, в зависимости от которого могут размещаться в различных геологических средах. Однако, в рамках настоящей работы мы ограничимся рассмотрением подземных хранилищ, созданных методом выщелачивания в отложениях каменной соли, которые наиболее перспективны для хранения газа[4].

Строительство подземных сооружений в каменной соли интенсивно развивалось с середины XX века. Сегодня ведущие позиции в подземном резервуаростроении занимают наиболее развитые в техническом и научном отношении страны Северной Америки (США, Канада) и Европы (Германия, Россия, Франция Великобритания). По данным ООО «Газпром геотехнологии» в настоящее время на территории Российской Федерации существует несколько подземных хранилищ газа (ПХГ) в отложениях каменной соли [5]. Их характеристика приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Характеристика ПХГ в отложениях каменной соли на территории Российской Федерации

Название ПХГ	Глубины размещения, м	Объем ПХГ, млн. м ³
Волгоградское	1100-1300	820
Калининградское	800-1000	700
Новомосковское	900-1100	780

Развитие топливно-энергетического комплекса указанных выше стран, его бесперебойная работа по транспортировке энергоносителей потребовали создания совершенной системы по их резервированию в больших количествах. Объектом для создания хранилищ явились различные геологические структуры и формации, среди которых особое место занимают соляные отложения. За последние 80 лет в них значительно расширилось строительство бесшахтных подземных резервуаров, которые в настоящее время используются для хранения сжатого природного газа, гелия, этилена, этана, пропана, бутана, светлых нефтепродуктов, мазута, нефти, газового конденсата, а также в качестве аккумуляторов сжатого воздуха на газотурбинных электростанциях. Заметно увеличилось применение этих сооружений для захоронения промышленных и радиоактивных отходов.

В настоящее время общемировой суммарный геометрический объем подземных резервуаров в соляных толщах, расположенных, как правило, в диапазоне глубин 800-1500 м, составляет несколько млн. км³ подземного пространства.

Подземные хранилища газа (ПХГ) сегодня размещаются преимущественно в отложениях каменной соли, которая благодаря своим свойствам, выступает в качестве эффективного геологического барьера и позволяет использовать при строительстве и эксплуатации резервуара эффективные скважинные технологии [1].

Стоит отметить, что выбираемое для строительства подземных сооружений месторождение каменной соли должно удовлетворять ряду условий. Так площадь распространения соляной залежи должна обеспечивать размещение заданного количества резервуаров с оставлением целиков между выработками. С экономической точки зрения глубина залегания каменной соли должна находиться в пределах от 150 м до 1500 м, однако теоритически возможно размещение ПХГ и на большей глубине. Необходимая мощность пласта каменной соли должна составлять не менее 10 м, что позволит создать выработку-емкость нужной формы и объема. Реально подземные хранилища газа в основном создаются в пластах каменной соли мощностью не менее 40 м. При этом каменная соль по химическому составу должна состоять более чем на 80 % из минерала NaCl. Также необходимым условием для создания ПХГ является наличие источника пресной воды и возможность удаления или захоронения рассола, полученного в процессе строительства подземных резервуаров.

На территории Российской Федерации в настоящее время разведано 12 соленосных бассейнов. Степень их изучения существенно различна. Наиболее изученными являются Калининградский, Подмосковный, Прикаспийский, Волго-Уральский, Печеро-Камский, Восточно-Сибирский бассейны и Серёговский купол.



Соленосные бассейны и районы: 1-Калининградский соленосный бассейн, 2-Подмосковный соленосный бассейн, 3-Двинско-Ветлужский соленосный бассейн, 4-Район Сереговского месторождения каменной соли, 5-Печоро-Камский соленосный бассейн, 6-Прикаспийский соленосный бассейн, 7-Волго-Уральский соленосный бассейн, 8-Северо-Кавказский соленосный бассейн, 9-Тувинский соленосный бассейн, 10-Северо-Сибирский соленосный бассейн, 11-Восточно-Сибирский соленосный бассейн, 12-Кемпендйский соленосный бассейн

Рисунок 1.1 - Схема распространения толщ соленосных пород на территории Российской Федерации [1].

Условия залегания и мощность каменной соли в ряде бассейнов представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 - Геологические условия залегания каменной соли в различных соленосных бассейнах

Соленосный бассейн	Глубина залегания кровли каменной соли, м	Мощность каменной соли, м	Содержание NaCl, %
Калининградский	700-1200	50-180	95-98
Подмосковный	680-1100	30-60	91-99
Волго-Уральский	500-1500	250-600	83-96
Печеро-Камский	300-600	10-300	96
Восточно-Сибирский	500-800	20-130	97-99

Важными особенностями ПХГ в отложениях каменной соли являются длительные сроки их эксплуатации (50 и более лет), значительные геометрические объемы (до 1 млн. м³) и глубины заложения, отсутствие прямого доступа в резервуары и отсутствие крепления выработки.

В связи с этим на этапах проектирования, строительства и эксплуатации ПХГ в отложениях каменной соли важной составляющей является определение условий, при которых сможет обеспечиваться структурная и функциональная устойчивость, и безаварийная работа созданных выработок на протяжении всего срока их эксплуатации.

Устойчивость ПХГ в соляных толщах обеспечивается за счет оптимальной формы соответствующей выработки и создания противодавления внутри резервуара [1,3].

Сами по себе массивы каменной соли характеризуются значительной устойчивостью во времени, за счет специфических свойств каменной соли.

Каменная соль отличается по своим механическим характеристикам от классических упругих пород или сыпучих, тем, что она является

пластичным материалом и обладает ярко выраженными реологическими свойствами, которые позволяют сохранять устойчивость массива на протяжении длительного времени за счет пластического течения, которое приводит к быстрому залечиванию образующихся дефектов (микротрещин) под действием вышележащих пород. Так если для других горных пород в процессе исследования их механических свойств достаточно определить взаимосвязь напряжений и деформаций, то для каменной соли необходимым условием является определение влияния временного фактора на взаимосвязь напряжений и деформаций.

Также стоит отметить, что каменная соль характеризуется ничтожно малой проницаемостью и низким содержанием влаги. Все эти свойства каменной соли позволяют строить в них подземные сооружения значительных геометрических размеров, без какой-либо крепи и на значительной глубине. Однако изменение напряженно-деформируемого состояния природного массива в процессе строительства подземных резервуаров может привести к образованию нарушенной зоны и появлению областей запредельного деформирования (ОЗД) рядом со стенками выработки. Из-за этого может развиваться процесс разрыхления пород и произойти утечка хранимого продукта.

Кроме того изменение напряженно-деформируемого состояния массива приводит к уменьшению объема выработанного пространства. В процессе длительной эксплуатации подземного резервуара, созданного в отложениях каменной соли, происходят процессы конвергенции и связанное с ними уменьшение объема резервуара. В результате действия горного давления, в каменной соли со временем развивается процесс ползучести. В связи с этим в процессе эксплуатации в выработку-резервуар помещается буферный газ, давление которого действует на стенки выработки, препятствуя развитию процесса ползучести. Давление буферного газа (минимальное противодействие хранимого продукта в резервуаре) рассчитывается по следующей формуле [2]:

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

где, $\gamma_f = 0,85$ – коэффициент надежности по нагрузке, согласно СП, п. 3.1 [2], для купольных месторождений $\gamma_f = 0,75$;

ρ_r – 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 – пролёт кровли выработки емкости, определяется по формуле.

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

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:

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

где a и β – безразмерные параметры, значения которых приведены в таблице 1.1 в зависимости от безразмерной величины σ , определяемой по формуле :

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

Таблица 1.3 – Безразмерные параметры a и β

h/l	σ	$a \cdot 10^5$	β
3 и более	1,105	29,6	4,8
	1,073	19,1	5,13
	1,04	4,9	6,19
1	1,105	22,3	4,63
	1,073	10,0	5,32
	1,04	1,1	7,23
1/3	1,105	4,5	6,41
	1,073	1,5	7,34
	1,04	0,72	7,37

Подводя итоги выше сказанному, необходимо отметить, что в последние годы широкое развитие получило создание подземных сооружений в отложениях каменной соли с целью хранения газа. Для создания подземных хранилищ газа, отложения каменной соли должны обладать рядом характеристик, так мощность отложений должна находиться в пределах 20-40 м, глубина залегания должна быть до 1500 м, содержание NaCl должно быть не менее 80 %.

1.2 Базовая информация о свойствах и напряженно-деформированном состоянии каменной соли, используемая при проектировании, строительстве и эксплуатации ПХГ

В процессе строительства ПХГ в массиве каменной соли происходит изменение напряженно-деформируемого состояния (НДС) последнего. Для оценки изменения НДС массива производят численное моделирование, по результатам которого дают оценку устойчивости породного массива на весь срок службы подземного резервуара.

Оценку устойчивости породного массива, в котором размещается подземный резервуар возможно производить методом конечных элементов, которой в свою очередь достаточно широко реализован в различных программных комплексах. Для расчета оценки устойчивости массива каменной соли необходима детальная информация о физико-механических свойствах каменной соли. Интересующие свойства получают в лабораторных условиях на образцах каменной соли путем их механического нагружения.

К основным физико-механическим свойствам каменной соли, которые необходимы для расчета устойчивости массива каменной соли относят прочностные, деформационные и реологические свойства.

Деформационные свойства в расчёте устойчивости играют не маловажную роль. Основные деформационные характеристики, которые используют в модели, при расчете устойчивости являются - модуль упругости E_y , модуль деформации E_d , коэффициент Пуассона ν . Данные

характеристики получают в лабораторных условиях непосредственно на образцах каменной соли путем деформационных измерений в процессе механического нагружения. Деформационные характеристики показывают связь между напряжениями и деформациями образца на различных стадиях деформирования.

В качестве прочностных характеристик в расчете устойчивости используют предел прочности и растяжения при одноосном сжатии, также предел прочности при объемном сжатии, угол внутреннего трения и сцепление каменной соли.

Также, как и при определении деформационных характеристик, предел прочности и растяжения при одноосном сжатии, получают в лабораторных условиях путем механического нагружения образцов.

В настоящее время существуют различные теории прочности материалов, но в механике горных пород наибольшее распространение получила теория прочности О. Мора [6]. Данная теория была подтверждена экспериментально Т. Карманом.

Схема Кармана заключается в создании трехосного сжатия, при котором $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$, где σ_1 -осевое напряжение, а $\sigma_2 = \sigma_3$ - боковое напряжение, действующие на исследуемый образец.

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, пример паспорта прочности представлен на рисунке 1.2.

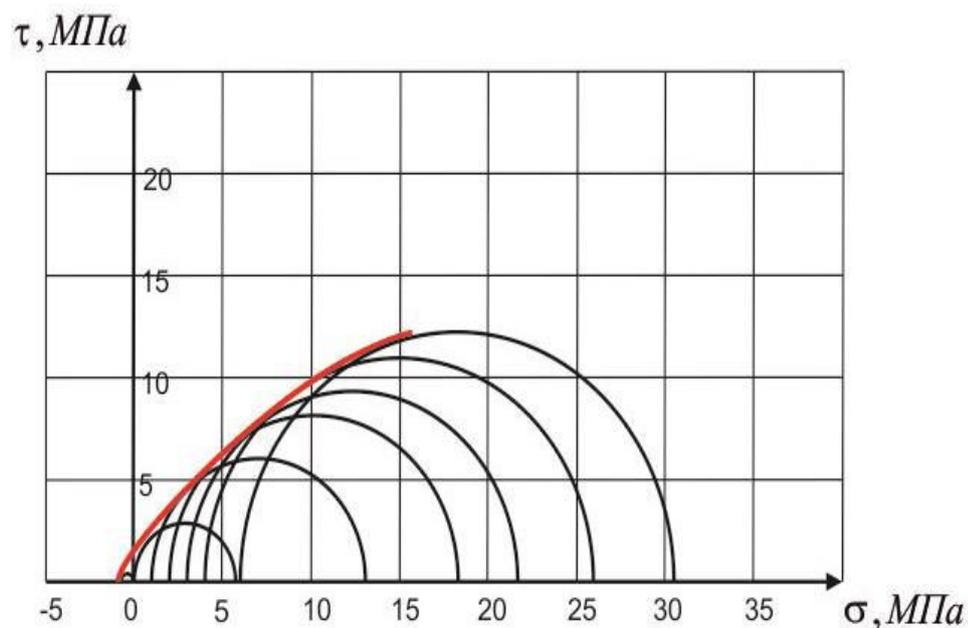


Рисунок 1.2 –Паспорт прочности каменной соли

Для каждого паспорта прочности (огибающей предельных кругов Мора) выделяются характерные прямолинейные участки, соответствующие определенным интервалам напряжений. На каждой огибающей выбирается столько характерных прямолинейных участков, количество которых охватывает весь интервал напряжений, в которых построена огибающая. К этим участкам проводятся касательные прямые линии, пересечение которых с осью τ (т.е. координата пересечения прямой линии с осью τ) является коэффициентом сцепления C на данном участке напряжений для данной разновидности каменной соли. Тангенсы угла наклона этих прямых являются коэффициентами внутреннего трения, а углы наклона φ являются углами внутреннего трения. На рисунке 1.3 представлен паспорт прочности каменной соли с выделенными наиболее характерными прямолинейными участками напряжений.

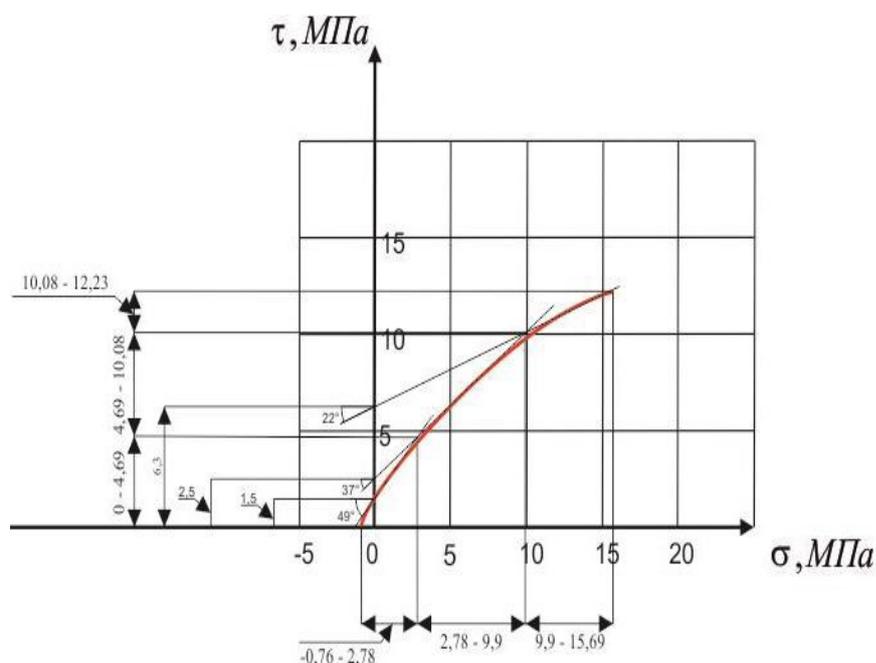


Рисунок 1.3 - Паспорт прочности каменной соли с выделенными прямолинейными участками, для которых определены сцепление и угол внутреннего трения

Реологические характеристики каменной соли определяются в экспериментах на ползучесть каменной соли. По уровню надёжности ползучесть является эталонным методом реологических испытаний, объективно отражающим влияние временного фактора, следовательно, важным моментом в экспериментах на ползучесть является планирование (задание напряжений), поскольку полученные реологические кривые должны иметь информативный характер, который бы позволил сделать достаточно точный прогноз поведения горной породы в течение срока службы подземного объекта. При длительном воздействии постоянной нагрузки в развитии деформаций ползучести можно выделить три стадии:

- 1) Неустановившаяся ползучесть (скорость деформирования уменьшается);
- 2) Установившаяся ползучесть (скорость деформирования постоянна);
- 3) Прогрессирующая ползучесть, соответствующая деформированию с непрерывно возрастающей скоростью, что обычно приводит к разрушению.

Для расчета устойчивости массива каменной соли необходимы параметры A , n и m , определяемые из экспериментов на ползучесть в условиях трехосного сжатия [7-10]. Данные параметры получают из уравнения ползучести:

$$\dot{\epsilon}^c = A \cdot (\bar{\sigma}^c)^n \cdot t^m, \quad (1.5)$$

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

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

t – время, сек;

A , n и m – параметры, определяемые из экспериментов на ползучесть в условиях трехосного сжатия.

Для определения выше перечисленных свойств используют как прямые, так и косвенные методы. Первые из них предполагают измерение деформаций образца при различных схемах и режимах их механического нагружения, а вторые – проведение активных или пассивных акустических измерений.

1.3 Прямые методы и результаты изучения физико-механических свойств каменной соли на образцах

Под прямыми методами в данной работе понимается изучение физико-механических характеристик в лабораторных условиях путем деформационных измерений при различных режимах нагружения образцов каменной соли.

Изучение физико-механических свойств каменной соли прямыми методами достаточно давно и детально исследовано. Процессы разрушения соляных пород - от зарождения дефектов в микрообъемах до развития магистральных трещин в массиве подробно рассмотрены в работах [11-14].

В последнее время вопросам разрушения соляных пород в лабораторных условиях при их одноосном сжатии посвящено достаточно много исследований. Так в работах [15-17] представлены результаты

проведения экспериментов по исследованию прочностных характеристик каменной соли полученные при одноосном режиме испытания. Результаты, представленные в данных работах свидетельствуют, о том, что предел прочности на одноосное сжатие σ_c и растяжение σ_p соляных горных пород, отобранных из разных месторождений находятся примерно в одинаковых интервалах значений. Также в работе отмечено, что если в образцах каменной соли присутствуют прослой нерастворимых пород (аргиллита, ангидрита), то их прочности при сжатии и растяжении увеличиваются. Такие же закономерности приведены в исследованиях, которые приведены в работах [19,20].

Каменная соль в зависимости от месторождения относится к различным литологическим разновидностям, для которых прочностные характеристики могут существенно отличаться. В работе [16] отображены основные результаты исследования прочностных свойств образцов каменной соли для разных литологических разновидностей. Кроме того, известно, что σ_c и σ_p могут существенно изменяться в зависимости от глубины залегания каменной соли в пределах одного месторождения. Так в работе [17] проведены лабораторные исследования образцов соляных пород, отобранных с различных глубин одного месторождения. По результатам исследований установлено, что с ростом глубины залегания каменной соли происходит рост прочностных характеристик. Однако стоит отметить, что надёжность этих результатов остаётся под вопросом, так как в лабораторных исследованиях, результаты, которых представлены в работах [16,18,20], соответствующие закономерности не наблюдались.

В работах [19,20,28] показано, что на процессы деформирования разрушения и изменения физико-механических свойств каменной соли влияют скорости деформирования и нагружения образцов. Установлено, что при различных скоростях деформирования и нагружения деформационные характеристики образцов каменной соли могут значительно отличаться.

В процессе деформирования каменной соли обычно наблюдаются 4 стадии деформирования - начальная, линейно-упругая, упруго-пластическая и стадия разрушения [20]. Однако в некоторых работах авторы выделяют в процессе деформирования образцов каменной соли три стадии деформирования – упругую, линейную и стадию разрушения[28-30].

Деформационные характеристики соляных пород подробно и детально изучались и в экспериментах с циклическими режимами нагружения. В работах [30-32] отображены результаты экспериментов при различном количестве циклов нагружения-разгрузки и различных максимальных напряжениях в каждом цикле. Установлено, что с ростом числа циклов наблюдается увеличение значения модуля упругости, а вот модуль деформации в таких экспериментах уменьшается. Также авторы отмечают, что в тех экспериментах, где максимальное напряжение в циклах составляло 40 % от средней прочности испытываемой породы наблюдалось упруго-пластическое деформирование. Такое деформирование подразумевает, что на каждом последующем цикле практически отсутствуют накопленные деформации предыдущего цикла. Установлено, что в экспериментах, где максимальные напряжения в каждом цикле нагрузки превышают значения 0,4 от σ_c , в каждом новом цикле наблюдается рост накопленных деформаций предыдущего цикла [31,32].

Исследователями уделяется также большое внимание изучению процесса изменения деформационных характеристик каменной соли при воздействии на массив различных технологических процессов при строительстве и эксплуатации подземных резервуаров. Так в разное время данная проблема изучалась в работах [33-35], где отмечается, что в процессе создания и эксплуатации ПХГ в массиве каменной соли наблюдается увеличение модуля упругости и снижение модуля деформации последней. Однако следует отметить, что данные выводы носят достаточно спорный характер, т.к. получены в лабораторных условиях, путем моделирования на

образцах технологических процессов, происходящих в подземном резервуаре, что не совсем корректно.

Известно, что прочностные и деформационные характеристики каменной соли, полученные в экспериментах в сложнапряженном состоянии значительно отличаются от характеристик, которые были получены в исследованиях при одноосном нагружении [36]. Так значения прочностных параметров каменной соли примерно на 20-25 процентов выше в исследованиях, проведенных в сложнапряженном состоянии, чем в экспериментах с одноосным нагружением. Установлено также, что механизм трещинообразования в образцах каменной соли при трехосном сжатии с постоянной скоростью нагружения носит несколько иной характер, существенно отличающийся от механизма, который возникает при проведении исследований в одноосном напряженном состоянии [37]. Авторы данного исследования связывают это различие с высокой пластичностью каменной соли и постоянно действующим боковым напряжением.

В связи с длительным сроком эксплуатации ПХГ особый интерес у исследователей вызывает поведение каменной соли под действием длительной нагрузки в одноосном и трёхосном состоянии [38-45]. В этих работах отмечено, что каменная соль проявляет реологические свойства с течением времени под воздействием длительной нагрузкой. Также авторы отмечают, что в процессе ползучести каменной соли различаются три стадии – неустановившейся, установившейся и прогрессирующей ползучести.

Принято считать, что момент начала разрушения образца соответствует переходу от стадии установившейся ползучести к стадии прогрессирующей. В этот момент наблюдается лавинообразный процесс трещинообразования в образце, который и приводит к разрушению [46,47]. Однако, такой момент наблюдается только в экспериментах в режиме одноосного нагружения.

Исследователями, установлено, что в трехосном напряжённом состоянии практически невозможно достичь перехода образца из стадии

установившейся в стадию прогрессирующей ползучести [40,42,48,54]. В связи с совершенствованием оборудования, в последнее время различными авторами проведены исследования по изучению различных факторов, влияющих на реологические свойства каменной соли [40,44,47,49,50,52]. Так установлено, что с увеличением в каменной соли включений, так называемых нерастворимых пород (ангидрита, аргиллита), процесс ползучести значительно замедляется, как в одноосном, так и в трёхосном состоянии. Для определения реологических параметров каменной соли используется достаточно много различных методик. В работах [49,51-53] проведен их сравнительный анализ, по результатам которого предложены оптимальные схемы проведения испытаний для определения реологических свойств соляных пород.

Актуальным вопросом в исследованиях поведения каменной соли при длительном нагружении является влияние насыщения её различными средами. Показано, что даже незначительное такое насыщение может привести к существенному изменению механических свойств каменной соли [21-27,54,55].

Подводя итоги выше сказанному, необходимо отметить, что вопросы, изучения физико-механических свойств и процесса разрушения соляных горных пород достаточно детально изучены. В настоящее время имеется много работ, в которых приведены основные положения, методики и результаты изучения физико-механических свойств каменной соли в лабораторных условиях на образцах.

Следует отметить, что исследование физико-механических свойств соляных пород прямым методом характеризуется относительно низкой точностью и значительной трудоёмкостью. Кроме того, такие измерения осуществляются на поверхности образца, и значит, не позволяют оценивать динамику структурной поврежденности во всём исследуемом объёме геоматериала. В связи с этим в последние годы наблюдается повышенный

интерес к косвенным (акустическим) методам изучения физико-механических свойства соляных горных пород.

1.4 Современное состояние и результаты акустико-эмиссионных исследований свойств и состояния каменной соли на образцах

На факт появления шумовых акустических сигналов («напоминающих тиканье часов») при деформировании каменной соли впервые в 1928 году обратил внимание академик А.Ф. Иоффе. Он же высказал предположение о том, что эти сигналы могут нести информацию о процессах деформирования и разрушения геоматериала [56]. Позже эти сигналы получили название деформационных шумов, или акустической эмиссии (АЭ). Систематические исследования АЭ при механическом нагружении образцов горных пород были начаты только в начале 50-х годов прошлого века [57,58]. Они продолжают интенсивно развиваться и в наши дни [59]. Причём значительное внимание в рамках указанных исследований уделяется именно соляным горным породам и, в частности, каменной соли.

Одной из важнейших особенностей АЭ при механическом нагружении каменной соли является её стадийность. Последняя выражается в том, что на различных стадиях деформирования активность АЭ имеет свои характерные особенности, позволяющие указанные стадии идентифицировать [60-62]. Происходящий по мере нагружения образцов переход от одной стадии АЭ к другой, по сути, отражает развитие разномасштабной поврежденности геоматериала [63]. Экспериментально установлено, что количество стадий деформирования, которые можно распознать по параметрам АЭ, зависит от режима нагружения образца каменной соли. Режим I - с постоянной скоростью нарастания напряжения (4 стадии), Режим II - с постоянной скоростью нарастания деформации (6 стадий) [60]. Отмечается также, что в режиме II, максимальное значение активности АЭ наступает после превышения предела прочности, а в режиме I – в момент максимального уплотнения каменной соли [61]. Таким образом,

для прогноза разрушения целесообразно использовать именно этот режим. Установленные по динамике АЭ границы между стадиями деформирования, очевидно, позволяют оценить некоторые физико-механические свойства каменной соли, в частности, такие как пределы прочности и упругости [60].

Установлено также [64,65], что при приближении к пределу прочности геоматериала, в амплитудном распределении событий АЭ увеличивается доля более высокоамплитудных составляющих. Однако, соответствующий признак приближающегося разрушения следует использовать достаточно осторожно. Это связано с тем, что по факту при реализации АЭ измерений мы имеем дело не с истинными амплитудами излучённых сигналов, а с их существенно меньшими значениями из-за затухания на пути от источника излучения (растущего дефекта) к приёмнику [66,67].

Исследовались также особенности АЭ при ступенчатом режиме нагружения образцов каменной соли. Было установлено, что в условиях неизменной нагрузки на каждой ступени наблюдается спад активности АЭ, который подчиняется закону Омори [68]. При этом максимум активности с приближением к моменту разрушения растёт. Эта закономерность может быть использована для решения связанных с разрушением прогнозных задач геоконтроля. В то же время отмечается, что такой характерный для предразрушения хрупких пород признак, как акустико-эмиссионное затишье, в каменной соли практически не проявляется [69].

АЭ при механическом нагружении различных типов горных пород характеризуются различной степенью однородности (равномерности энерговыделения). Причём у пластичных пород и, в частности, каменной соли, указанная однородность существенно больше, чем у хрупких, а энергия АЭ соответственно меньше [70].

В 1953 году была опубликована работа Й. Кайзера, посвящённая исследованию особенностей АЭ при циклическом нагружении горных пород с возрастающей от цикла к циклу нагрузкой [71]. В рамках указанного

исследования автором был открыт эффект, получивший впоследствии его имя (эффект Кайзера). Этот эффект заключается в невозпроизводимости активности АЭ в процессе циклического нагружения до тех пор, пока нагрузка в последующем цикле не превысит максимальную нагрузку предшествующего цикла. В последние годы указанный эффект всё чаще называют акустико-эмиссионным эффектом памяти (АЭЭП), так как с его использованием по результатам тестовых испытаний становится возможным восстановить информацию об испытанных ранее напряжениях [72].

Особенности проявления указанного эффекта в каменной соли в каких-то аспектах аналогичны соответствующим особенностям в других, например, хрупких породах, а в каких-то имеют свои отличия. Так во всех породах с увеличением временного интервала между установочным и тестовым циклами «память затухает» и проявляется менее чётко. Однако в пластичных породах, и в каменной соли, в частности, по сравнению с хрупкими это происходит существенно быстрее [73-75].

Во всех породах память проявляется более чётко при совпадении схем и режимов нагружения в установочном и тестовом циклах. Кроме того, во всех типах пород «память ухудшается» под влиянием помеховых факторов прежде всего нагревания, увлажнения, увеличения времени между установочным и тестовым циклами нагружения [76,77]. Однако, как установлено экспериментально, с увеличением времени выдержки в установочном цикле чёткость проявления памяти в тестовом цикле повышается только у пластичных пород [78,79]. В то же время, с увеличением временного интервала между установочным и тестовым циклами нагружения память у каменной соли стирается быстрее, чем у хрупких. Однако, как установлено экспериментально, время сохранности памяти у каменной соли составляет не менее 15 суток [72]. Такого времени вполне достаточно для извлечения образца из массива и его тестового испытания для установления действующих в массиве напряжений.

В условиях трёхосного нагружения горных пород в установочном цикле I память проявляется при величине одноосного тестового напряжения в цикле II, представляющего собой линейную комбинацию главных напряжений σ_2^I и σ_3^I установочного цикла [80].

$$\sigma_1^{II} = \sigma_2^I - (k+1) \sigma_3^I, \quad (1.6)$$

где k – коэффициент, зависящий от коэффициента трения μ между берегами трещин, имеет индивидуальное значение для каждой породы.

В пластичных породах коэффициент трения μ существенно меньше, чем у хрупких, как следствие меньше и коэффициент k . В частности, у каменной соли k находится в пределах от 0,45 до 0,55 [81].

Важной особенностью проявления АЭЭП в каменной соли является его наличие в запредельной области, в которой из-за высокой пластичности не наблюдаются процессы полного разрыва структурных связей в образце и сохраняется его значительная несущая способность [82,83].

В натуральных условиях каменная соль может находиться в режимах, близких к режиму релаксации напряжений. Установлено, что и в этом случае АЭЭП, хотя и менее чётко, но всё же проявляется достаточно для использования при решении практических задач контроля напряжённо-деформированного состояния. Если сравнивать деформационный эффект памяти в каменной соли, испытанной в режиме ползучести, с акустико-эмиссионным, то последний характеризуется существенно более чётким проявлением [84].

Подводя итоги рассмотрения закономерностей акустико-эмиссионных эффектов при различных режимах механического нагружения в каменной соли, следует отметить, что они исследовались, как правило, при постоянных и относительно низких (комнатных) температурах. Особенности их формирования и проявления при высоких температурах, а также при переходе от низких температур к высоким и обратно (то есть, для температурных режимов, характерных для соляного массива в зоне размещения ПХГ), то до настоящего времени не практически не изучались.

1.5 Влияние температурных воздействий на физико-механические свойства каменной соли

Структурная и функциональная устойчивость ПХГ во многом определяется качеством проектных решений, которые базируются на информации прогнозного характера о структурных особенностях соляного массива, его напряженно-деформированном состоянии и физико-механических свойствах каменной соли. Последние традиционно определяются лабораторным путем при комнатных температурах. Однако, важной особенностью условий, в которых находится каменная соль в окрестностях ПХГ, являются повышенные температуры, поскольку подземные резервуары в соляных массивах обычно размещаются на глубине до 2000 м и более, где с учетом геотермического градиента температуры могут достигать 50 -55 °С [3]. Так, например, температура соляных массивов, в которых располагаются Астраханское и Чу-Чжовское (Китай) ПХГ достигают 55-60 и 60-65 °С соответственно. Также следует учитывать, что на температурный режим каменной соли, из которой сложен массив, вмещающий подземный резервуар, существенное влияние оказывают технологические процессы, связанные с эксплуатацией подземного хранилища. В результате таких процессов температура в приконтурной зоне ПХГ может увеличиваться до 60-70 °С.

В связи с этим при определении физико-механических свойств каменной соли в лабораторных условиях чрезвычайно важно учитывать реальные термобарические условия, в которых она находится в массиве.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям зависимости упругих, прочностных, акустических и других свойств в функции от температуры посвящено достаточно много различных работ [85-93]. Однако большинство из них касается магматических пород, а для каменной соли соответствующих исследований проведено относительно мало.

Изменения упругих свойств каменной соли с увеличением температуры подробно рассмотрены в работе [94], где показано, что такое

увеличение сопровождается снижением соответствующих параметров. Аналогичные результаты были получены в работах [95,96] для широкого диапазона температур от 25 до 240 °С.

Результаты экспериментов показывают, что характер изменения прочностных свойств горных пород от температуры не является общим для всех их типов. В зависимости от особенностей минералогического состава и структурных связей в породах изменение прочностных свойств при нагревании происходит по различным законам.

Изучение влияния высоких температур на прочностные показатели позволяет разделить все горные породы по характеру температурных зависимостей на две группы:

I – породы, в которых с увеличением температуры прочностные показатели возрастают до некоторого максимума, а затем снижаются;

II – породы, в которых с увеличением температуры прочностные показатели сразу снижаются или до определенных температур изменяются мало, а затем уменьшаются [90].

Каменная соль относится ко второй группе пород.

На характер изменения прочностных характеристик горных пород при высоких температурах влияют внешние и внутренние факторы, среди которых определяющими являются минеральный состав, свойства структурных связей и условия залегания. Большую роль в снижении прочностных показателей пород при нагреве играет также их естественная пластичность, препятствующая возрастанию пределов прочности и развивающаяся под действием высоких температур.

Природа изменения прочности пород с повышением температуры зависит от их структурных особенностей, термостойкости минералов и цементов, составляющих породу, и других признаков.

В справочнике [87] приведены экспериментальные данные по определению прочностных свойств доломитов и каменной соли при

нормальных условиях и при повышенных температурах при трехосном сжатии (таблицы 1.3, 1.4).

Закономерности влияния температуры на пределы прочности и предел текучести каменной соли наглядно видны из данных, полученных на образцах из Припятской впадины. При одинаковых условиях нагружения температурное поле способствует уменьшению пределов прочности и текучести каменной соли. Влияние температурного поля на величину деформации более сложное.

Таблица 1.3 – Продольная ε_1 и поперечные $\varepsilon_2=\varepsilon_3$ деформации, пределы прочности σ_{ic} и текучести σ_{is} при неравномерном трехосном сжатии по схеме Кармана типа $\sigma_1>\sigma_2=\sigma_3$ и температуре 20°C.

Порода	$\sigma_2=\sigma_3$, МПа	σ_{is} , МПа	ε_1 , %	σ_{ic} , МПа	ε_1 , %	$\varepsilon_2=\varepsilon_3$, %
Соль каменная	25	18	0,08	44	0,95	2,26
	50	70	0,19	98	13,40	10,90

Таблица 1.4 – Продольная ε_1 и поперечные $\varepsilon_2=\varepsilon_3$ деформации, пределы прочности σ_{ic} и текучести σ_{is} при неравномерном трехосном сжатии по схеме Кармана $\sigma_1>\sigma_2=\sigma_3$ и разных температурах.

Порода	$\sigma_2=\sigma_3$, МПа	T, °C	σ_{is} , МПа	ε_1 , %	σ_{ic} , МПа	ε_1 , %
Соль каменная	150	100	9,3	0,2	43	13,0
	150	60	12,9	0,2	51,7	13,4
Соль каменная с ангидритом	150	100	157	2,6	200,4	13,1

В работах [94-99] авторами проведены исследования влияния повышенных температур на прочностные свойства каменной соли. Были изучены изменения предела прочности на сжатие и растяжение в одноосном

и трехосном состояниях при температурах в диапазоне от 25 до 300 °С. По результатам исследований было отмечено, что с ростом температуры прочностные показатели каменной соли уменьшаются.

Температурные зависимости ползучести каменной соли отражены в основном в американских исследованиях [100-101].

Немецкие ученые изучали образцы каменной соли из шахты Asse, Германия с глубины около 800 м. Испытания проводились в диапазоне температур от 30 до 250°С и в диапазоне давлений от 1,7 до 40 МПа. В целях надежности, на каждой стадии испытаний деформирование продолжалось до достижения устойчивой ползучести; детальное описание методики испытаний представлено в работе [104]. Максимальная деформация на одной стадии составила от 1 до 40% и зависела от условий опыта. Одна стадия испытаний занимала от 30 минут до 1 года и больше.

В более поздней статье [105] авторы развивают положения термической активации микромеханизмов ползучести. Исследования проводились в диапазонах температур от 22 до 250°С и в диапазоне давлений от 2 до 30 МПа. Были проанализированы закономерности влияния температурного поля на образцы с различных глубин от 800 до 254 м.

Также очень интересные исследования ползучести при высоких температурах и микромеханизмах ползучести были проведены немецкими учеными U. Hunsche, A. Hampel [106]. Для образцов солей различных месторождений немецкими исследователями было проведено изучение ползучести в условиях трехосного сжатия при уровнях бокового давления $(0,01-0,04) \sigma_{сж}$. При напряжениях до $2,5 \sigma_{сж}$ и температурах до 115 °С, скорость ползучести низка и носит затухающий характер, но при том же уровне напряжений и повышении температуры до 170°С возникает устойчивое течение образцов с достижением деформации около 10% за 12 часов, т.е. скорость деформации составляет $\approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$.

При уровнях напряжений около $0,4 \sigma_{сж}$ только для низких температур наблюдается затухающая ползучесть, а при повышении температуры до 80°С

скорость резко увеличивается и за время 40-48 часов деформации достигают 10-11% (скорость деформации $(6-7) \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$). Повышение температуры до 115°C вызывает рост скорости деформации до $2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}^{-1}$ и устойчивое течение образца.

Таким образом, одновременное воздействие температуры свыше 80°C при уровне напряжений более $0,4\sigma_{\text{сж}}$ приводит к значительным скоростям устойчивой ползучести каменной соли [106].

Некоторые вопросы влияния температурного поля на ползучесть каменной соли рассматривались на осенней сессии Solution mining research institute (SMRI) в 1998 году в связи с вопросами безопасности подземных хранилищ. Была отмечена нелинейность зависимости деформации от температуры при ползучести и важность микромеханизмов температурной активации ползучести.

При разных температурах и режимах нагружения ползучесть развивается за счет различных механизмов, зоны влияния которые требуется разделить для определения пределов экстраполяции. Кроме того, различные механизмы могут сочетаться, что усложняет зависимость деформаций при ползучести от температуры [108].

О тесной взаимосвязи скоростей ползучести с температурой свидетельствуют и результаты исследований, приведенные в работах [108-109].

В работах [110-112,113] проведено исследование влияния повышенных температур на скорость ползучести каменной соли в одноосном и трехосном состоянии. Авторы показывают, что с увеличением температуры скорость растет, как в экспериментах при одноосном сжатии, так и в сложнапряженном состоянии.

Обобщая выше сказанное, можно отметить, что практически все авторы признают важность продолжения влияния температуры на физико-механические свойства каменной соли. Во многом это связано с тем, что результаты соответствующих исследований в ряде случаев носят

противоречивый характер. Так некоторые авторы отмечают, что влияние температуры носит незначительный характер прочностные и деформационные свойства каменной. Другие авторы в своих исследованиях утверждают, что влияние повышенных температур оказывает значительно изменение прочностных и деформационных параметров каменной соли.

Также стоит отметить, что большинство полученных деформационных, прочностных и реологических характеристик каменной соли исследованы в лабораторных условиях при повышенных температурах в ходе достаточно коротких экспериментов и в одноосном напряжённом состоянии.

Также отсутствуют работы, которые описывают взаимосвязь напряжений и деформаций от действующих повышенных температур.

Выводы и постановка задач исследований

Проведенный анализ проблем при строительстве и эксплуатации подземных резервуаров в отложениях каменной соли, а также в области изучения физико-механических свойств соляных пород прямым и косвенным методами с учетом влияния на эти свойства повышенных температур позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Наиболее безопасными и экономически эффективными являются подземные хранилища газа, сооружаемые в отложениях каменной соли. Для создания ПХГ необходима толща каменной соли, залегающая на глубине от 300 до 1500 м и имеющая мощность от 20 м с содержанием минерала NaCl от 80 %.

2. Для ПХГ, сооружаемых в соляных толщах, характерны значительная глубина заложения, сложная форма, чрезвычайно большие объёмы, отсутствие крепления, значительные сроки эксплуатации, а также повышенные требования к их длительной функциональной и структурной устойчивости. Возможности управления такой устойчивостью в процессе эксплуатации ПХГ чрезвычайно ограничены, в связи с чем особую роль

приобретает качество проектных решений, используемых при строительстве ПХГ. В свою очередь обеспечение указанного качества возможно только при наличии надёжной информации о физико-механических свойствах пород вмещающего массива, которые получают в лабораторных условиях путем механических испытаний образцов. К физико-механическим свойствам каменной соли, которые необходимы для обеспечения устойчивости ПХГ относят прочностные, деформационные и реологические.

3. Основным методом исследования физико-механических свойств каменной соли являются прямые деформационные измерения механически нагружаемых образцов. Указанные свойства в настоящее время достаточно хорошо изучены, однако преимущественно в условиях комнатных температур.

4. Лабораторные исследования свойств каменной соли на основе прямых деформационных измерений имеют ряд недостатков. Это, прежде всего, низкая точность и высокая трудоёмкость, а также невозможность получения информации о развитии деформационных процессов и разрушения во всём объёме образца, а не только на его поверхности. В связи с этим, в последние годы значительный интерес проявляется к косвенным и, прежде всего, акустико-эмиссионным методам определения физико-механических свойств и напряжённого состояния соляных пород. С помощью акустико-эмиссионных измерений, проводимых при различных схемах и режимах механического нагружения каменной соли, можно с довольно высокой надёжностью определить стадии её деформирования, идентифицировать переход в прогрессирующую ползучесть, оценить пределы упругости и длительной прочности при одноосном и трехосном сжатии. Кроме того, используя акустико-эмиссионный эффект памяти возможна оценка напряжений в соляном массиве.

5. В настоящее время исследования свойств и состояния каменной соли с использованием акустико-эмиссионного метода проводятся достаточно ограниченно, но главное без учёта реальных термобарические

условий, в которых строятся и эксплуатируются ПХГ. Прежде всего это относится к температурам вмещающих ПХГ пород, которые могут достигать 70 °С и более. Это существенно снижает ценность получаемой акустико-эмиссионной информации и возможности реального её использования при решении задач геоконтроля, связанных со строительством ПХГ.

Указанные выше выводы обуславливают сформулированную выше цель настоящей диссертационной работы, для достижения которой необходимо решение следующих задач.

1. Исследовать закономерности изменения активности АЭ, а также продольных и поперечных деформаций образцов каменной соли на различных стадиях деформирования при повышенных температурах и существенно различных скоростях одноосного деформирования.

2. Определить закономерности изменения активности АЭ, продольных и объёмных деформаций на различных стадиях деформирования образцов каменной соли при их объёмном нагружении и различных температурах.

3. Установить закономерности изменения активности АЭ, продольных и поперечных деформаций в образцах каменной соли при их реологических испытаниях в условиях одноосного и трёхосного механического нагружения и длительного ступенчато возрастающего термического воздействия.

4. Установить особенности проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в каменной соли при её циклическом нагружении с возрастающим и повторяющимся от цикла к циклу максимальным напряжением при высоких температурах и переходе от низких температур к высоким и обратно.

Глава 2. Экспериментальные исследования деформационных и акустико-эмиссионных свойств каменной соли при различных режимах механического нагружения и повышенных температурах

Как было отмечено в главе 1, на территории Российской Федерации в настоящее время известны около 20 бассейнов каменной соли. Все они достаточно хорошо изучены, исходя из потенциальных возможностей использования соляных пород в качестве сырья для химической и пищевой промышленности, а также непосредственно соляных массивов для размещения в них различных народнохозяйственных объектов и, в частности, подземных хранилищ газа (ПХГ). Для строительства последних в различное время детально изучались вещественный состав, геологические условия залегания, литологические и структурно-текстурные особенности, а также условия образования соляных толщ Калининградского, Тульского, Волгоградского и др. месторождений. Кроме того, при проектировании, строительстве и эксплуатации ПХГ всегда существовало понимание необходимости знания прочностных, деформационных и реологических свойствах каменной соли.

Акустико-эмиссионные характеристики каменной соли начали изучаться существенно позже и сразу в комплексе с механическими, прежде всего деформационными. Соответствующие исследования осуществлялись в лабораторных условиях на образцах, отобранных из Тульского и Калининградского месторождений. Подробное описание результатов этих исследований, которые проводились при комнатных температурах приведено в работе [60].

Рассматриваемые в рамках настоящей главы результаты комплексного и синхронного исследования акустико-эмиссионных и деформационных параметров каменной соли получены в условиях повышенных температур. Объектами исследования являлись образцы каменной соли, изготовленные из керна, полученного при бурении 4 технологических скважин

Калининградского ПХГ и 7 поисково-разведочных скважин на территории Тульского месторождения каменной соли.

Полный комплекс исследований включал в себя детальное изучение геологических условий нахождения соляных пород в массиве, их вещественного состава, структурно-текстурных особенностей и физико-механических свойств, которые необходимы при проектировании, строительстве и эксплуатации ПХГ.

2.1 Вещественный состав и структурно-текстурные особенности соляных пород

Геологическое изучение соляных пород из скважин Калининградского и Тульского месторождений производилось согласно принятым нормативным документам и общепринятым методикам [117-121].

По результатам геологического изучения была дана следующая характеристика исследуемых пород.

В районе Калининградского месторождения объектом исследования являлась каменная соль, вскрытая в технологических скважинах 5Т-8Т и приуроченная к отложениям преугольской свиты верхней перми.

Каменная соль залегает на глубине 870-1030 м с процентным содержанием минерала NaCl 96-97 %. Соль представлена своей бесцветной, матовой белой и полупрозрачной разновидностями. Структура породы изменяется от среднезернистой до крупно-гигантозернистой, иногда встречается мелкозернистая. Текстура соли массивная, иногда косослоистая.

На протяжении всех скважин соленосный разрез представлен каменной солью с редкими прослоями нерастворимых пород, а именно - ангидрита мощностью до 3 мм. Частота распределения ангидритовых пачек увеличивается от середины к краям разреза.

В районе Тульского месторождения объектом исследования являлась соленосная толща, представленная отложениями среднего девона дорогобужского горизонта.

Каменная соль залегает в интервале 830-880 м и сложена несколькими типами, которые различаются между собой структурно-текстурными особенностями.

В настоящей работе изучалась каменная соль, которая наиболее распространена в районе Тульского месторождения. Она представляет собой породу средне – крупнозернистой структуры, цвет породы изменяется от прозрачного до полупрозрачного. Текстура не яснослоистая, массивная. Содержание минерала NaCl в породе колеблется от 90 до 98 %.

2.2 Закономерности акустической эмиссии каменной соли при различных скоростях одноосного деформирования и температурных воздействиях

Физико-механические свойства соляных пород изучались различными методами, с учётом общепринятых правил и стандартных методик [117].

При этом определялись:

- плотность пород (ρ), кг/м³;
- влажность W, %;
- предел прочности при одноосном сжатии σ_c , МПа;
- предел прочности при одноосном растяжении σ_p , МПа.

По измеренным в ходе экспериментов напряжениям σ_1 , относительным продольным ε_1 и поперечным ε деформациям ε_1 и ε_2 по соответствующим методикам [122,123] рассчитывались следующие деформационные и упругие характеристики соляных пород: объемная деформация $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$; модуль деформации E_0 ; модуль Юнга E; коэффициент Пуассона ν .

В качестве акустических и акустико-эмиссионных характеристик пород определялись и рассчитывались:

- скорости распространения ультразвуковых продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн;
- активность акустической эмиссии \dot{N}_Σ ;
- суммарная акустическая эмиссия N .

Непосредственно объектом исследования, на котором проводились исследования закономерностей акустической эмиссии при различных скоростях одноосного деформирования и температурных воздействиях, являлась прошедшая предварительное цензурирование выборка из 48 цилиндрических образцов каменной соли высотой 80 мм и диаметром 40 мм, отобранных с глубины 950 м в районе строительства Калининградского ПХГ.

Выборка была разделена на три равные группы. На образцах первой группы были получены физико-механические характеристики каменной соли в условиях одноосного нагружения, которые в последствии были усреднены и брались в качестве базовых для сравнения. Образцы второй группы подвергались одноосному нагружению вплоть до разрушения с постоянной скоростью деформирования $\dot{\epsilon}_1=0,3$ мм/мин в условиях индивидуальной для каждого образца температуры, соответственно $T_1=23$ °С, $T_2=40$ °С, $T_3=60$ °С. Температурные условия испытаний образцов третьей группы были теми же, что и второй. Однако скорость их деформирования составляла $\dot{\epsilon}_2=0,03$ мм/мин. В ходе каждого эксперимента измерялись и регистрировались испытываемые образцом температуры T_i , одноосное напряжение σ_1 , активность \dot{N}_Σ возникающей АЭ, а также продольные ϵ_1 и поперечные $\epsilon_2=\epsilon_3$ деформации, подробное описание результатов исследований приведено в работе [116].

По результатам проведённых исследований на образцах первой группы были получены следующие усредненные основные физико-механические свойства: плотность $\rho = 2140$ кг/м², модуль упругости $E_y = 26000$ МПа, модуль деформации $E_d = 1445$ МПа, предел прочности при сжатии $\sigma_c = 24,2$ МПа, предел прочности при растяжении $\sigma_p = 2,2$ МПа, скорости распространения продольных и поперечных упругих волн $V_p = 4,2$ км/с и $V_s = 2,2$ км/с соответственно.

Экспериментальные исследования проводились с использованием аппаратного комплекса, блок-схема которого представлена на рисунке 2.1.

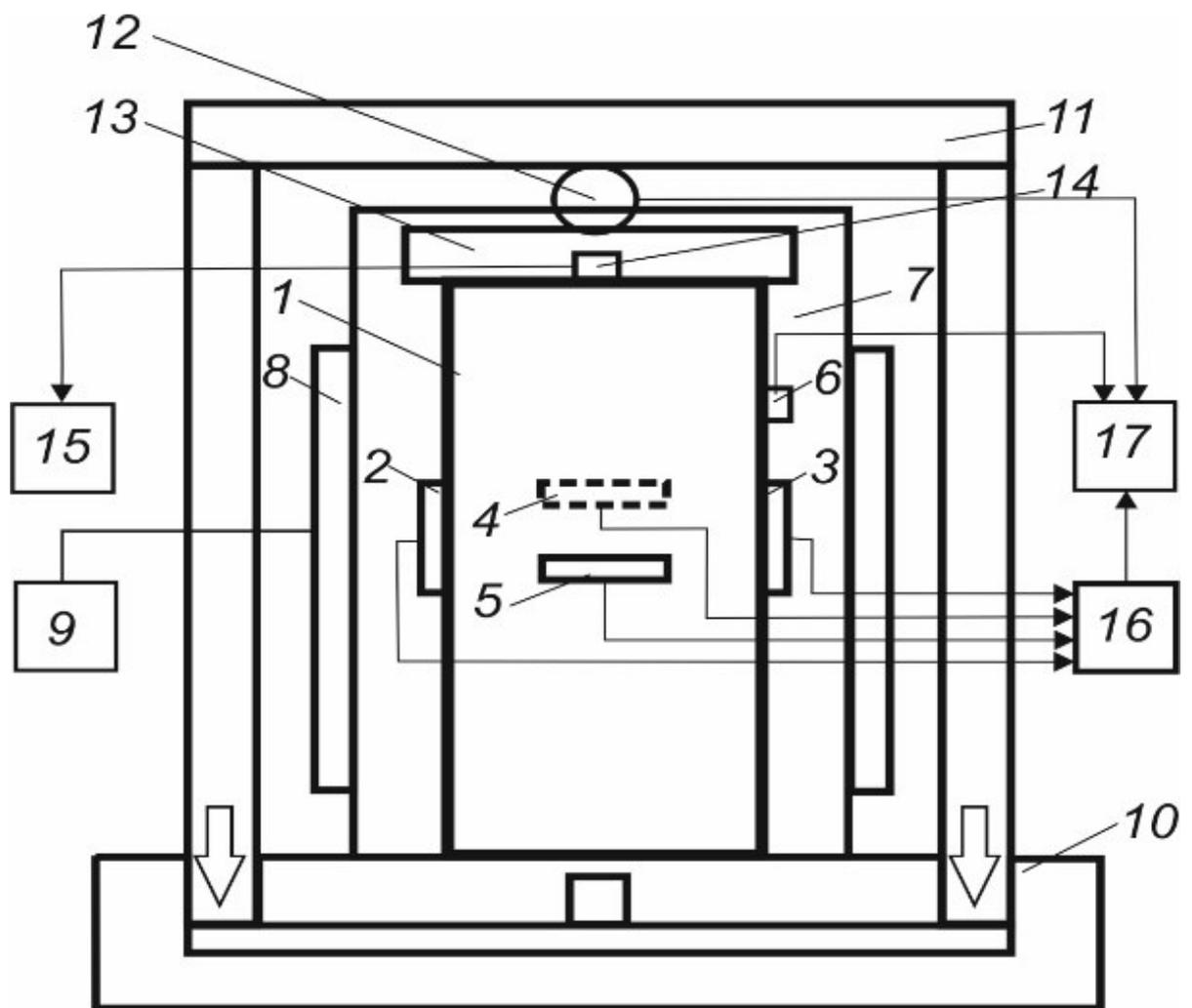


Рисунок 2.1 - Блок схема аппаратного комплекса для измерения и регистрации напряжений, деформаций и акустической эмиссии при постоянной скорости деформирования образцов и различных температурах.

Образец каменной соли 1 с закреплёнными на нём тензодатчиками продольных 2,3 и поперечных 4,5 деформаций, а также датчиком температуры 6 помещался в цилиндрическую камеру 7. Нагрев этой камеры до заданной температуры осуществлялся размещённым по её периметру электронагревательным элементом 8, подключённым к программируемому терморегулятору 9. С помощью электродвигателя силовой установки Geotek 10 осуществлялось перемещение рамы 11 в направлении, показанном стрелками.

Через датчик силы 12 и защитный корпус 13 это перемещение передавалось исследуемому образцу, создавая в нём напряжения, вызывающие сигналы АЭ. Эти сигналы, принятые размещенным в корпусе 13 пьезоэлектрическим преобразователем 14, подавались на акустико-эмиссионную измерительную систему 15 A-line 32D. Деформации тензодатчиков 2-5 с помощью измерительных мостов 16 преобразовывались в электрические сигналы, которые подавались на компьютер 17. На него же поступали сигналы с датчиков температуры 6 и силы 12. Таким образом, осуществлялось синхронная регистрация указанных выше информативных параметров T_i , σ_1 , \dot{N}_Σ , ε_1 и ε_2 .

По результатам проведенных экспериментов для каждой из температур T_i и скоростей деформирования $\dot{\varepsilon}_1$ и $\dot{\varepsilon}_2$ были получены характерные зависимости. Так на рисунках 2.2, 2.5 и 2.8 представлены зависимости отражающие изменения продольной ε_1 и объёмной деформаций $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_2$, а также активности АЭ \dot{N}_Σ образца каменной соли в функции от напряжения σ_1 .

На рисунках 2.3, 2.6 и 2.9 представлены зависимости, отражающие изменения напряжения σ_1 и активности АЭ \dot{N}_Σ , в функции от продольной деформации ε_1 , а на рисунках 2.5, 2.7 и 2.10 показаны характерные зависимости, на которых отображены изменения напряжения σ_1 и суммарной АЭ N в функции от продольных деформаций ε_1 .

Анализ экспериментальных данных показал, что акустическая эмиссия в процессе деформирования каменной соли носит не монотонный характер и имеет свои существенные особенности при каждой конкретной температуре испытаний образцов и скорости их деформирования. Причём, эти особенности для каждого образца индивидуальны. В тоже время на всех графиках, представленных на рисунках 2.2, 2.3, 2.5, 2.6, 2.8 и 2.9 можно выделить 4 стадии деформирования: начальную (I), линейно-упругую (II), упругопластическую (III), разрушения (IV). На каждой из стадий, границы между которыми на выше указанных рисунках отмечены пунктирными

линиями, имеют место определённые качественные структурные изменения в образцах. Также можно отметить, что на характерных зависимостях, представленных на рисунках 2.3, 2.6 и 2.9 начальная (I) и линейно-упругая (II) стадии деформирования выделяются не так четко, как на графиках, которые показаны на рисунках 2.2, 2.5 и 2.8.

На стадии I (стадии пригрузки) происходит локальное разрушение поверхности образца, связанное с несовершенством её и формы самого образца, а также незначительное уплотнение, связанное с началом закрытия пор и трещин. На стадии II образец испытывает линейно-упругое деформирование без каких-либо значимых структурных изменений. Стадия III характеризуется началом трещинообразования, а стадия IV - дальнейшим ростом трещин и разрушением образца. Подробное описание изменения активности АЭ \dot{N}_Σ и деформаций ε_l , ε_v на указанных стадиях при различных температурах для $\dot{\varepsilon}_1=0,3$ мм/мин, основанное на данных рисунков 2.2, 2.5 и 2.8, приведено в таблице 2.1, а для $\dot{\varepsilon}_2=0,03$ мм/мин - в таблице 2.2.

По характерным зависимостям изменения суммарной активности АЭ N в функции от продольных деформаций ε_1 , которые отображены на рисунках 2.5, 2.7 и 2.10 сложно выделить 4 стадии деформирования. Однако данные зависимости, показывают различный характер проявления АЭ при различных скоростях деформирования.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что характер зависимостей $\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$ и $\varepsilon_v = f(\sigma_1)$ достаточно плавный. Они не проявляют каких-либо явных особенностей на границах между стадиями деформирования, что затрудняет чёткое выделение последних.

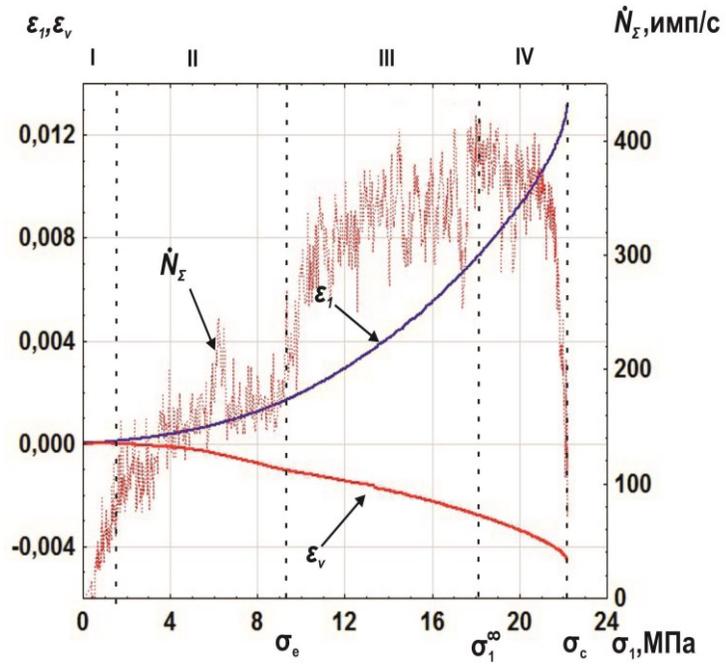
В силу дискретности и неоднородности геоматериала возникающая в нём акустическая эмиссия также дискретна и не стационарна. Это создаёт своеобразную шумовую составляющую и затрудняет выделение границ стадий деформирования по функции $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$. Однако, благодаря достаточно резким изменениям параметра \dot{N}_Σ , на указанных границах, их выявление с относительно высокой надёжностью оказывается возможным.

Физически это понятно, если учесть, что переход на новую стадию деформирования сопровождается сменой механизма и новым масштабным уровнем структурных изменений геоматериала, для которых характерны соответствующие особенности АЭ.

Сравнение активности АЭ показывает, что её максимальные значения $\dot{N}_{\Sigma m}$ имеют место на стадии упругопластического деформирования и превышают соответствующие значения даже на стадии разрушения. Такой результат, наблюдаемый для обеих скоростей деформирования $\dot{\epsilon}_1$ и $\dot{\epsilon}_2$, объясняется тем, что на стадии разрушения из-за возникновения крупномасштабных дефектов значительно возрастает затухание сигналов АЭ. Как следствие, часть из этих сигналов просто не регистрируется. Для скорости деформирования $\dot{\epsilon}_1$ с увеличением температуры максимальное значение $\dot{N}_{\Sigma m}$ в пределах каждой стадии уменьшается. При этом для обеих скоростей деформирования в рамках одного температурного режима переход от I к III стадии деформирования сопровождается ростом $\dot{N}_{\Sigma m}$ и только на IV стадии $\dot{N}_{\Sigma m}$ уменьшается.

Изменение скоростей деформирования образцов и воздействующих на них температур приводит к смещению верхних границ стадий II и III. При одних и тех же температурах переход от $\dot{\epsilon}_1$ к $\dot{\epsilon}_2$ сопровождается смещением указанных границ в сторону больших значений напряжений σ , а при одних и тех же значениях $\dot{\epsilon}_1$ и $\dot{\epsilon}_2$ увеличение температур приводит к смещению этих границ в сторону меньших значений напряжений σ .

а.



б.

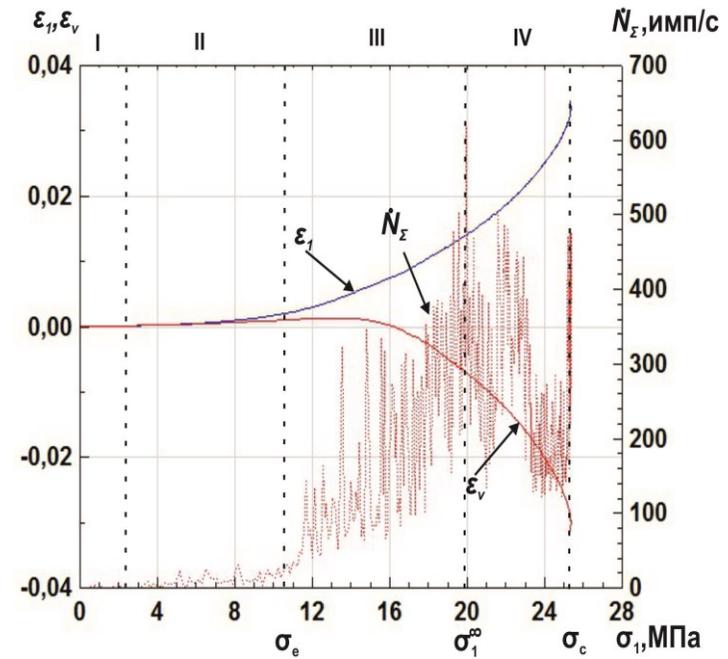
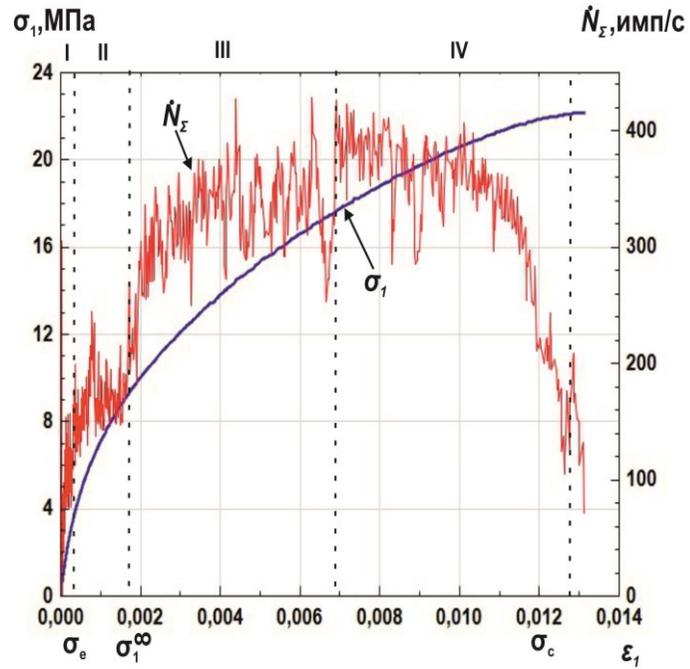


Рисунок 2.2 - Зависимости $\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$, $\varepsilon_v = f(\sigma_1)$ и $\dot{N}_z = f(\sigma_1)$, полученные при температуре $T=23^\circ\text{C}$ в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования $\dot{\varepsilon}_1=0,3$ мм/мин (а) и $\dot{\varepsilon}_2=0,03$ мм/мин (б)

а.



б.

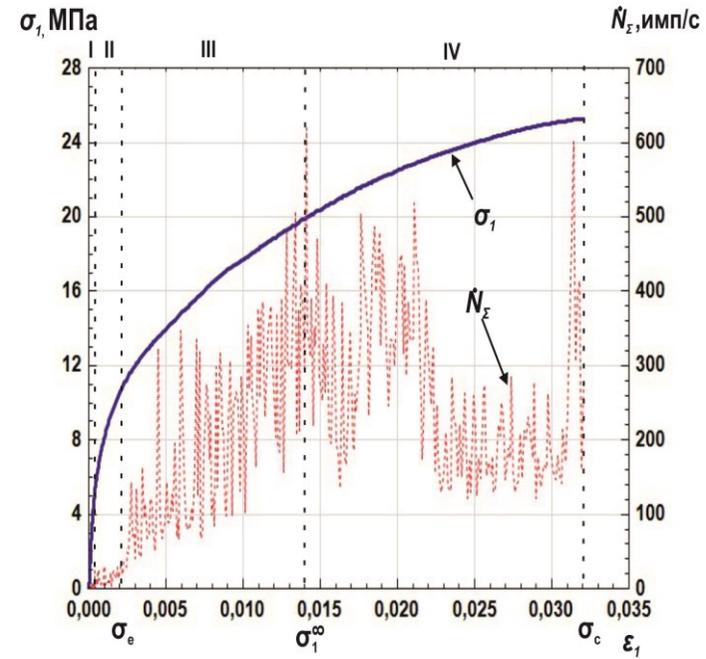
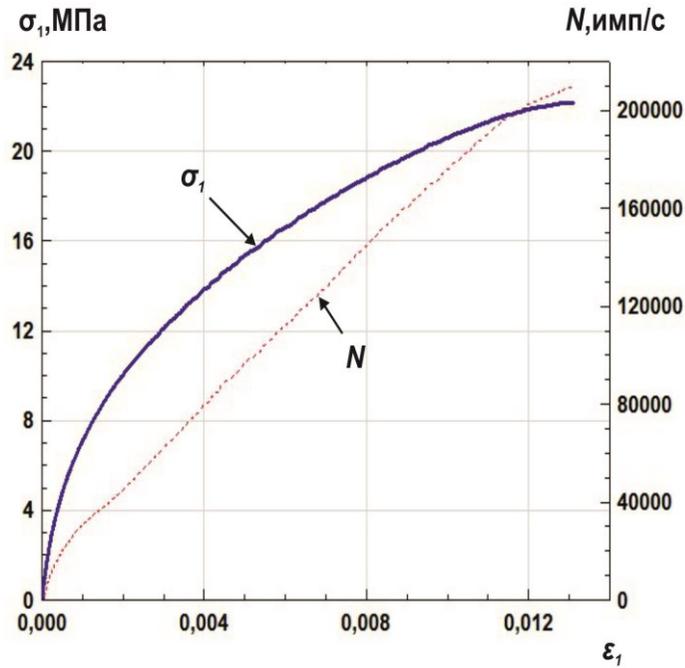


Рисунок 2.3 - Зависимости $\sigma_1 = f(\varepsilon_1)$ и $\dot{N}_z = f(\varepsilon_1)$, полученные при температуре $T=23^\circ\text{C}$ в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования $\dot{\varepsilon}_1 = 0,3$ мм/мин (а) и $\dot{\varepsilon}_2 = 0,03$ мм/мин (б)

а.



б.

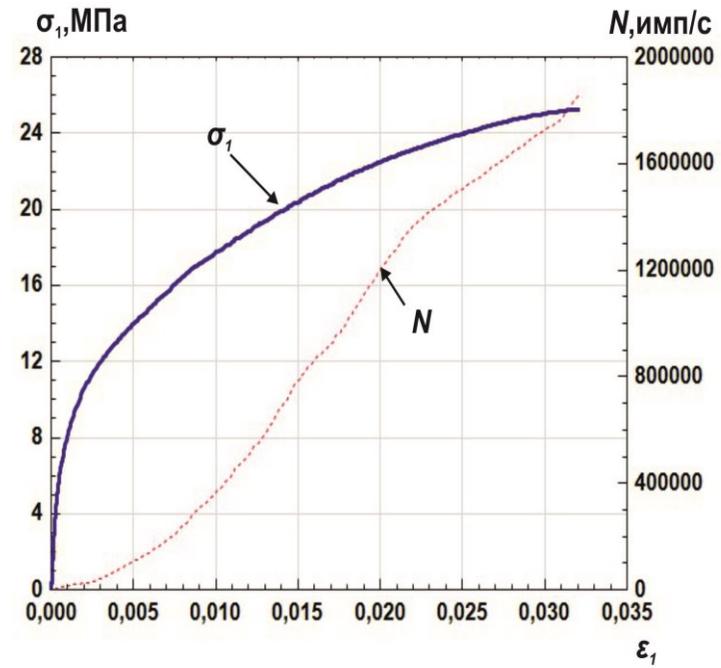
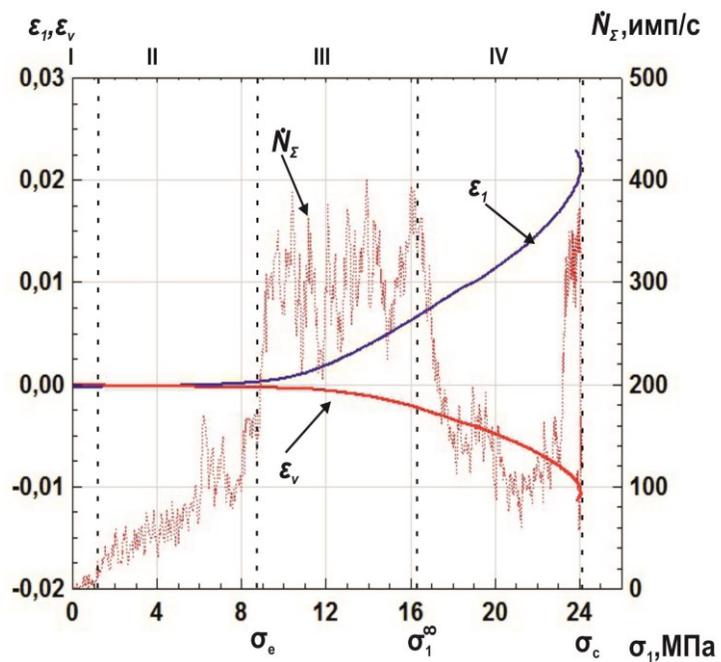


Рисунок 2.4 - Зависимости $\sigma_1 = f(\epsilon_1)$ и $N = f(\epsilon_1)$, полученные при температуре $T=23^\circ\text{C}$ в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования $\dot{\epsilon}_1 = 0,3$ мм/мин (а) и $\dot{\epsilon}_2 = 0,03$ мм/мин (б)

а.



б.

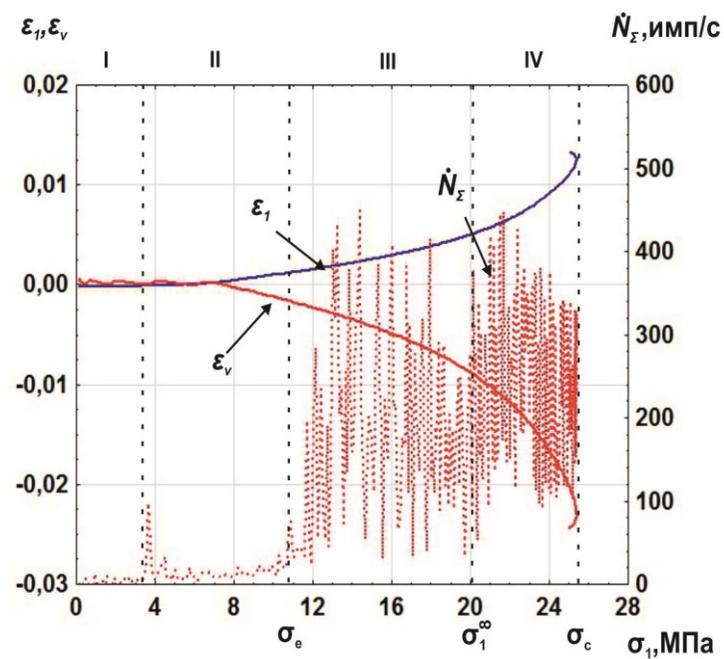
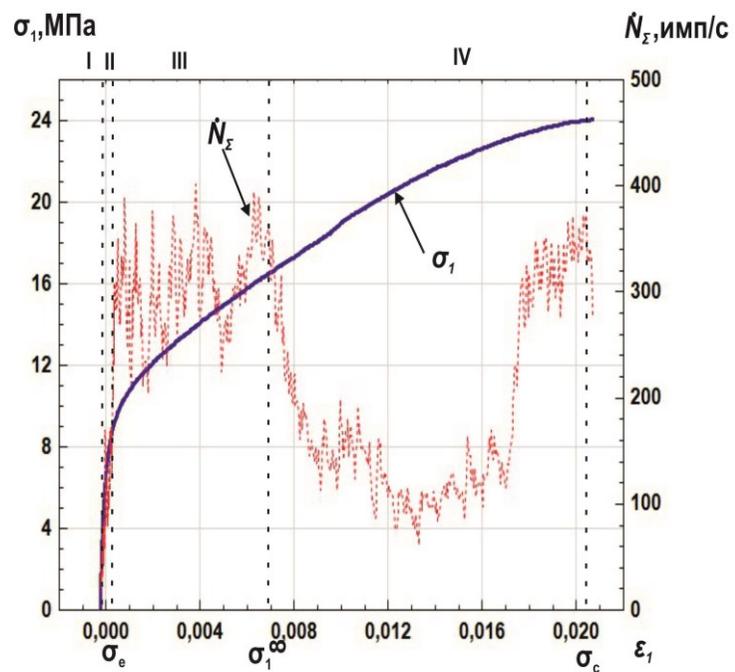


Рисунок 2.5 - Зависимости $\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$, $\varepsilon_v = f(\sigma_1)$ и $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$, полученные при температуре $T=40^\circ\text{C}$ в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования $\dot{\varepsilon}_1 = 0,3$ мм/мин (а) и $\dot{\varepsilon}_2 = 0,03$ мм/мин (б)

а.



б.

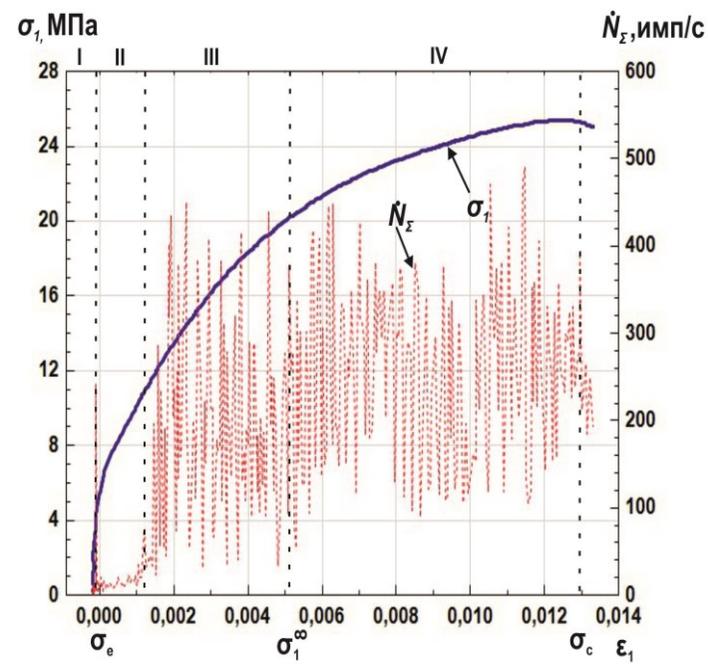
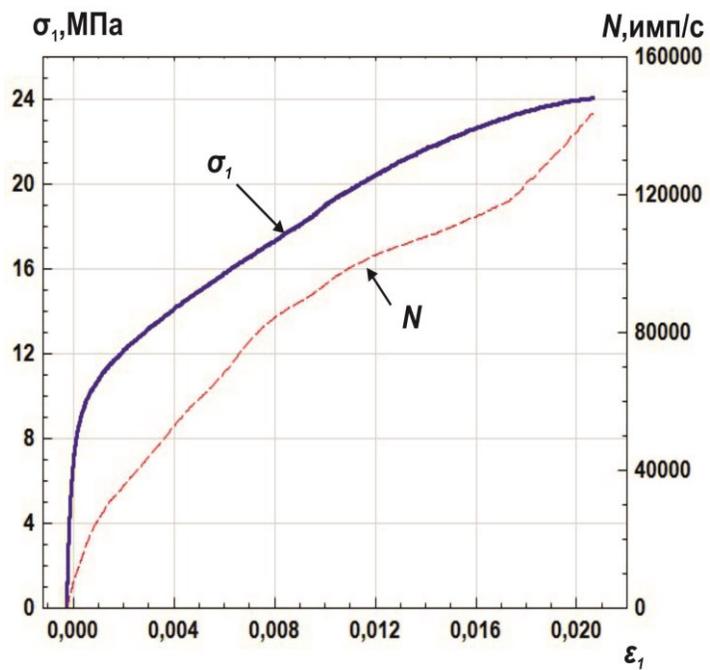


Рисунок 2.6 – Зависимости $\sigma_1 = f(\epsilon_1)$ и $\dot{N}_z = f(\epsilon_1)$, полученные при температуре $T=40^\circ\text{C}$ в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования $\dot{\epsilon}_1 = 0,3$ мм/мин (а) и $\dot{\epsilon}_2 = 0,03$ мм/мин (б)

а.



б.

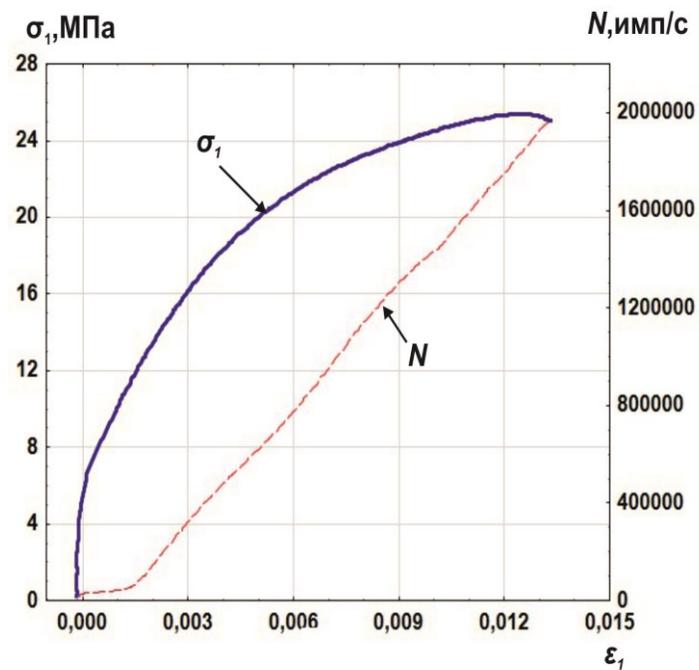
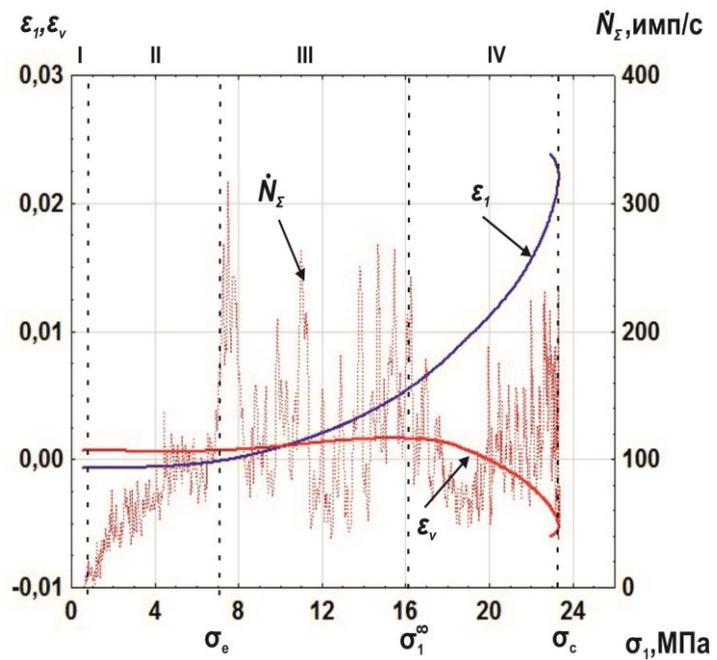


Рисунок 2.7 – Зависимости $\sigma_1 = f(\epsilon_1)$ и $N = f(\epsilon_1)$, полученные при температуре $T=40$ °С в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования $\dot{\epsilon}_1 = 0,3$ мм/мин (а) и $\dot{\epsilon}_2 = 0,03$ мм/мин (б)

а.



б.

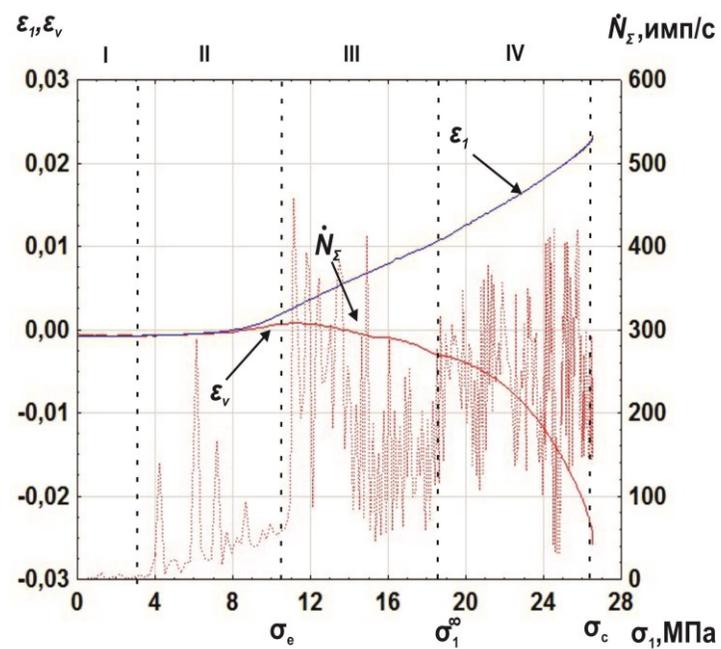
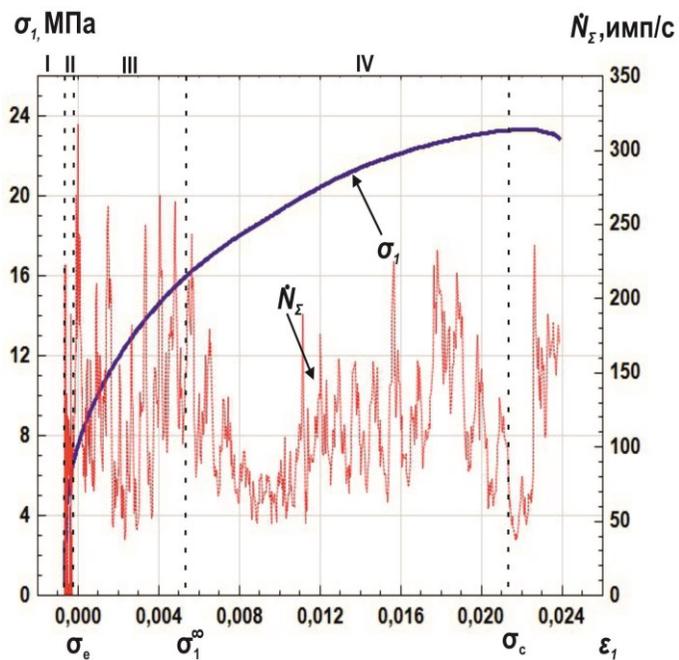


Рисунок 2.8 - Зависимости $\epsilon_1 = f(\sigma_1)$, $\epsilon_v = f(\sigma_1)$ и $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$, полученные при температуре $T=60^\circ\text{C}$ в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования $\dot{\epsilon}_1=0,3$ мм/мин (а) и $\dot{\epsilon}_2=0,03$ мм/мин (б)

а.



б.

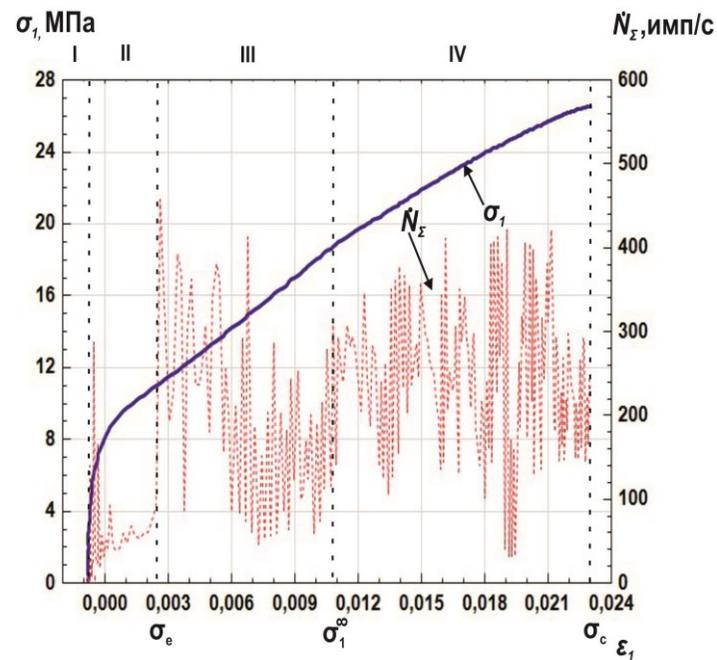


Рисунок 2.9 - Зависимости $\sigma_1 = f(\varepsilon_1)$ и $\dot{N}_z = f(\varepsilon_1)$, полученные при температуре $T=60^\circ\text{C}$ в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования $\dot{\varepsilon}_1 = 0,3$ мм/мин (а) и $\dot{\varepsilon}_2 = 0,03$ мм/мин (б)

а.

б.

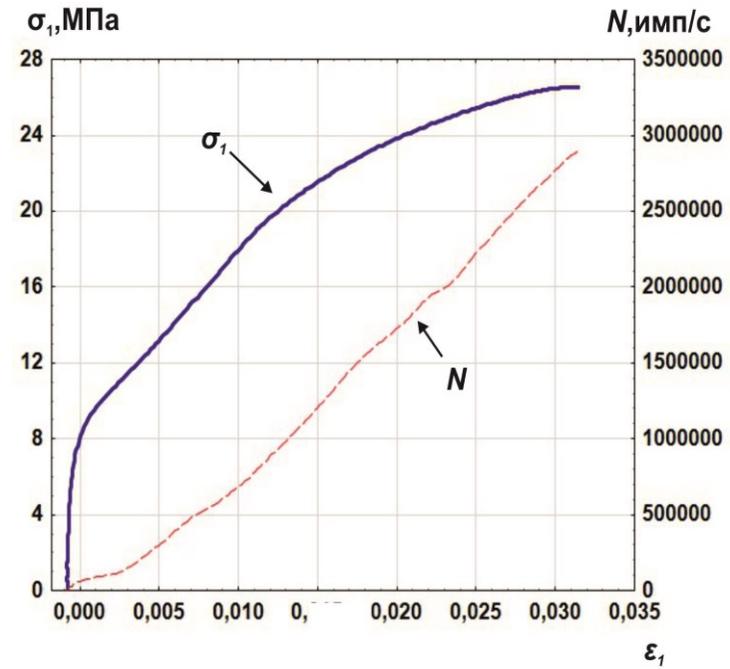
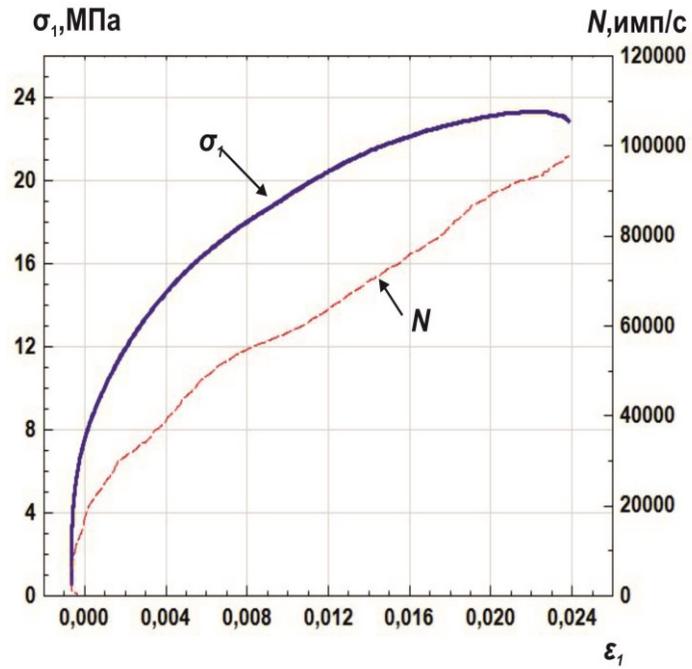


Рисунок 2.10 – Зависимости $\sigma_1 = f(\epsilon_1)$ и $N = f(\epsilon_1)$, полученные при температуре $T=60$ °С в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования $\dot{\epsilon}_1 = 0,3$ мм/мин (а) и $\dot{\epsilon}_2 = 0,03$ мм/мин (б)

Таблица 2.1 - Изменения деформаций и активности АЭ образцов каменной соли в пределах $\Delta\sigma$ каждой из стадий деформирования при $\dot{\varepsilon}_1 = 0,3$ мм и различных температурах

T, °C	Стадии	Начальная	Линейно-упругая	Упругопластическая	Разрушения
23	$\Delta\sigma = f(\sigma_c)$	0 - 0,08	0,08 - 0,42	0,42 - 0,84	0,84 - 1
	$\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Экспоненциальное увеличение в 4 раза	Экспоненциальное увеличение в 4,6 раз	Нелинейное увеличение в 1,7 раза
	$(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Нелинейное увеличение в 2 раза	Нелинейное увеличение в 3 раза	Нелинейное увеличение в 1,5 раза
	$\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$, имп/с	Линейное увеличение от 0 до 130	Экспоненциальный рост от 130 до 200	Скачок от 200 до 300, затем нелинейный рост до 420	Нелинейное уменьшение от 420 до 300
40	$\Delta\sigma = f(\sigma_c)$	0 - 0,06	0,06 - 0,38	0,38 - 0,70	0,70 - 1
	$\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Увеличение в самом конце стадии в 2 раза	Нелинейное увеличение в 8 раз	Нелинейное увеличение в 2,2 раза
	$(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Увеличение в самом конце стадии в 1,1 раза	Нелинейное увеличение в 2,5 раза	Нелинейное увеличение в 4 раза
	$\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$, имп/с	Линейное увеличение от 0 до 40	Нелинейное увеличение от 40 до 180	Скачок от 180 до 300, затем нелинейное увеличение до 395	Нелинейный спад от 395 до 120, затем скачок до 380
60	$\Delta\sigma = f(\sigma_c)$	0 - 0,04	0,04 - 0,29	0,29 - 0,62	0,62 - 1
	$\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Увеличение в 1,5 раза в конце стадии	Нелинейное увеличение в 7 раз	Нелинейное увеличение в 4,8 раза
	$(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Отсутствие изменений	Линейное увеличение в 1,2 раза	Нелинейное увеличение в 3 раза
	$\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$, имп/с	Нелинейное увеличение от 0 до 20	Экспоненциальное увеличение от 20 до 110	Скачок от 110 до 310, падение до 80 и затем рост до 220, с выбросами до 260	Нелинейное уменьшение от 220 до 50, затем нелинейный рост до 180

Таблица 2.2 - Изменения деформаций и активности АЭ образцов каменной соли в пределах $\Delta\sigma$ каждой из стадий деформирования при $\dot{\varepsilon}_1 = 0,03$ мм и различных температурах

T, °C	Стадии	Начальная	Линейно-упругая	Упруго пластическая	Разрушения
23	$\Delta\sigma = f(\sigma_c)$	0 - 0,12	0,12 - 0,44	0,44 - 0,81	0,81 - 1
	$\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Незначительное увеличение в конце стадии	Почти линейное увеличение в 4 раза	Экспоненциальное увеличение в 2,6 раза
	$(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Отсутствие изменений	Незначительное увеличение в конце стадии	Нелинейное увеличение в 25 раз
	$\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Нестационарное, увеличение от 0 до 20	Скачкообразное увеличение от 20 до 600	Спад до 120, затем рост до 400 и спад до 250
40	$\Delta\sigma = f(\sigma_c)$	0 - 0,14	0,14 - 0,44	0,44 - 0,8	0,8 - 1
	$\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Незначительный рост, начиная с середины стадии	Экспоненциальное увеличение в 3,5 раза	Нелинейное увеличение в 2 раза
	$(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Незначительный рост, начиная с середины стадии	Экспоненциальное увеличение в 7,5 раза	Нелинейное увеличение в 3 раза
	$\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$	Увеличение от 0 до 8	Нелинейный увеличение от 10 до 60	Нелинейное увеличение от 60 до 440, затем спад до 120	Нелинейное увеличение от 120 до 450, затем спад до 380
60	$\Delta\sigma = f(\sigma_c)$	0 - 0,15	0,15 - 0,40	0,40 - 0,72	0,72 - 1
	$\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Незначительный рост в конце стадии	Линейное увеличение в 6 раз	Экспоненциальное увеличение в 3 раза
	$(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1)$	Отсутствие изменений	Отсутствие изменений	Незначительный рост в конце стадии	Экспоненциальный рост в 25 раз
	$\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$	Увеличение от 0 до 8	Скачок от 8 до 115, затем выбросы до 290 и спад до 70	Скачок от 70 до 450, затем спад до 80	Нелинейное увеличение от 80 до 450, затем спад до 150

По положению верхних границ II, III и IV стадий деформирования могут быть оценены пределы упругости σ_e длительной прочности σ_1^∞ и прочности при сжатии σ_c каменной соли.

В таблице 2.3 приведены экспериментально полученные при различных скоростях деформирования и температурах значения σ_e/σ_c и σ_1^∞/σ_c .

Таблица 2.3 - Относительные значения механических характеристик образцов каменной соли

Относительные значения механических характеристик	$\dot{\varepsilon}_1=0,3$ мм/мин			$\dot{\varepsilon}_2=0,03$ мм/мин		
	T=23 °C	T=40 °C	T=60 °C	T=23 °C	T=40 °C	T=60 °C
σ_e/σ_c	0,42	0,38	0,29	0,44	0,43	0,41
σ_1^∞/σ_c	0,84	0,70	0,62	0,81	0,80	0,72

Как видно из таблицы 2.3 с увеличением температуры относительные значения σ_e/σ_c и σ_1^∞/σ_c уменьшаются, причём в большей степени для скорости деформирования $\dot{\varepsilon}_1$, чем для скорости $\dot{\varepsilon}_2$.

2.3 Закономерности акустической эмиссии, продольных и объемных деформаций каменной соли при её нагружении по схеме Кармана и температурных воздействиях

Для исследования закономерностей проявления акустической эмиссии каменной соли при её нагружении по схеме Кармана и температурных воздействиях были отобраны образцы каменной соли Калининградского месторождения, полученные с использованием кернового бурения с глубины 950 м. Всего было отобрано 27 цилиндрических образцов высотой и диаметром 100 мм и 50 мм соответственно. Все образцы были относительно однородны, что подтверждалось их предварительным цензурированием ультразвуковым время-импульсным методом.

Испытания каждого из образцов проводилось в режиме трёхосного механического нагружения по схеме Кармана. При этом скорость осевого нагружения была постоянна и составляла $(d\sigma_1/dt)=\text{const}=0,05$ МПа/с, а поддерживаемое постоянным боковое напряжение составляло $\sigma_2=\sigma_3=\text{const}=5$ МПа. Осевое нагружение осуществлялось вплоть до разрушения, причём температура для каждого из трёх образцов из выборки была индивидуальна и составляла $T_1=23$ °С, $T_2=40$ °С, $T_3=60$ °С соответственно. Таким образом, при каждом конкретном режиме термобарических воздействий испытания проводились трижды и затем сравнивались. Это сравнение показало качественную близость соответствующих результатов акустико-эмиссионных и деформационных измерений. Поэтому ниже для каждого температурного режима приводится только один экспериментальный результат, подробное описание результатов исследований приведено в работе [115].

В процессе каждого эксперимента велись непрерывные измерения и запись испытываемых образцом температур T_i , одноосного σ_1 и бокового $\sigma_2=\sigma_3$ напряжений, активности \dot{N}_Σ АЭ, продольных ε_1 и поперечных деформаций $\varepsilon_2=\varepsilon_3$.

Экспериментальные исследования проводились с использованием, представленного на рисунке 2.11 измерительного комплекса на основе установки длительного сжатия УДС 65/80. Главным отличием этого комплекса от представленного на рисунке 2.1 является то, что он реализует сложное напряжённо-деформированное состояние образца по схеме Кармана при постоянной скорости осевого нагружения.

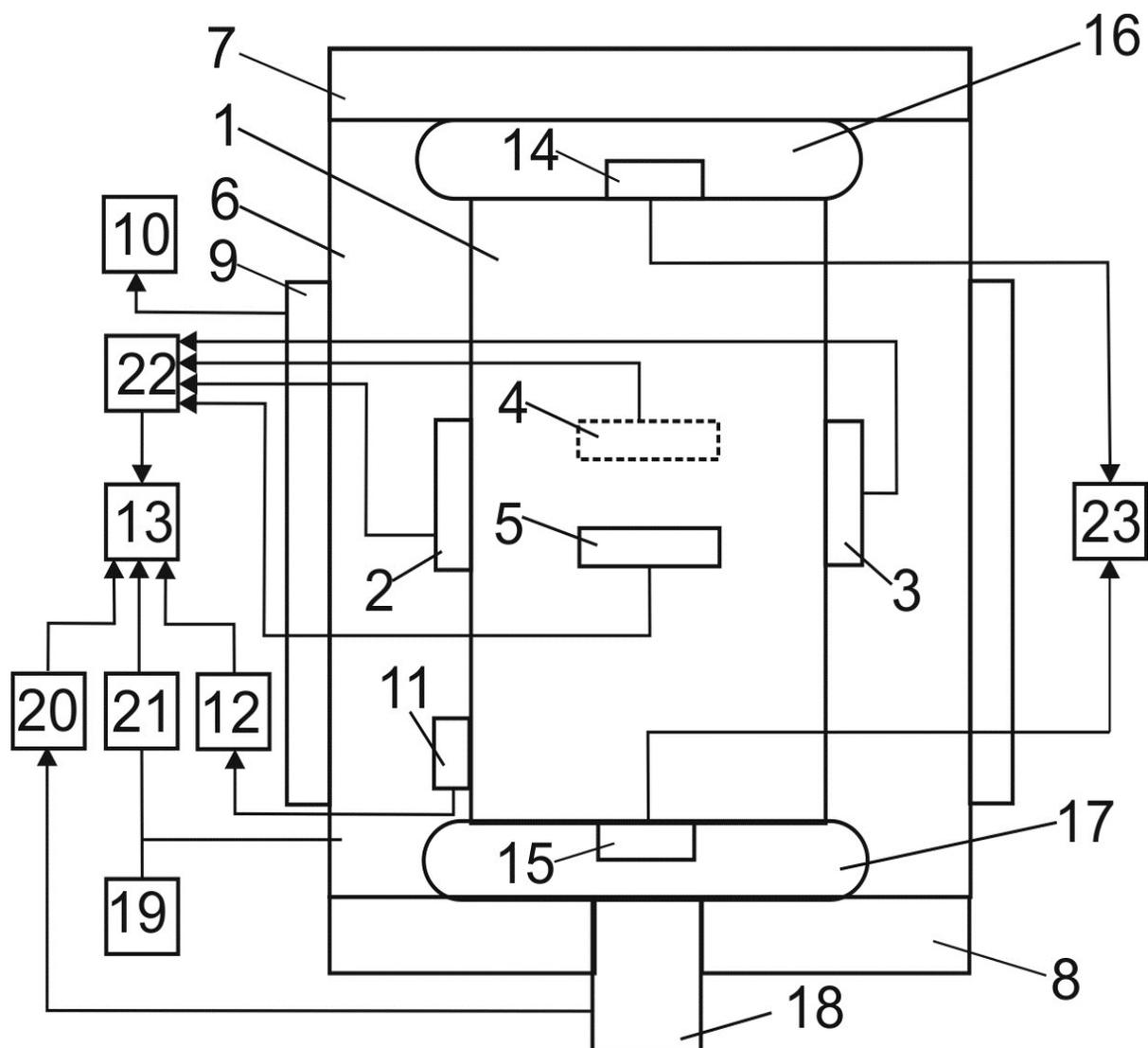


Рисунок 2.11 - Блок-схема измерительного комплекса для исследования динамики акустической эмиссии образцов каменной соли в условиях трехосного сжатия и повышенных температур

Образец 1 каменной соли в резиновой оболочке с прикрепленными на нём тензодатчиками продольных 2,3 и поперечных 4,5 деформаций, устанавливался в цилиндрическую камеру 6, которая была заполнена маслом. Герметичность камеры обеспечивали верхняя крышка 7 и нижняя крышка 8. Нагрев самой камеры осуществлялся термонагревательным элементом 9, который расположен по периметру камеры и подключён к программируемому терморегулятору 10. Контроль температуры образца осуществлялся с помощью закреплённой на нем термопары 11, передающей

сигнал на терморегистратор 12, который подключён к ЭВМ 13. Приемные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) акустической эмиссии 14 и 15 размещались в верхнем 16 и нижнем 17 защитных корпусах, которые прижимались к торцевым поверхностям образца. С помощью поршня 18 силовой установки создавалось давление на нижний защитный корпус 17, через который это давление передавалось на образец 1. Боковое давление создавалось масляным насосом 19. Контроль осевого давления осуществлялся с использованием датчика 20, а бокового с использованием датчика 21, которые подключались к ЭВМ 13. Деформации, которые возникали на исследуемом образце, с помощью тензометров 2,3 и 4,5, входящих попарно в измерительные мосты тензостанции 22 также передавались на ЭВМ 13, где с помощью программного обеспечения A-stest регистрировались и обрабатывались. Сигналы акустической эмиссии, регистрируемые ПЭП 14 и 15 передавались на акустико-эмиссионную измерительную систему 23 A-line 32D. Таким образом, производилась одновременная регистрация испытываемых образцом температур T_i , осевых σ_1 и боковых напряжений $\sigma_2=\sigma_3$, возникающих под их влиянием осевых ε_1 и боковых деформаций $\varepsilon_2=\varepsilon_3$ и активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ .

По результатам экспериментов были получены характерные зависимости, которые отражают изменение продольной ε_1 и объемной $\varepsilon_v=\varepsilon_1+2\varepsilon_3$ деформаций, а также активности АЭ \dot{N}_Σ образца соли в функции от девиатора напряжений $\sigma_d=\sigma_1-\sigma_3$ при различных температурах T_i , которые отображены на рисунках 2.12, 2.14 и 2.16. Зависимости, отображенные на рисунках 2.13, 2.15 и 2.17, показывают изменения девиатора $\sigma_d=\sigma_1-\sigma_3$ и активности АЭ \dot{N}_Σ образца каменной соли в функции от продольной деформации ε_1 .

Анализируя полученные данные, следует отметить, что в процессе деформирования каменной соли с постоянной скоростью одноосного нагружения АЭ носит не монотонный характер и при различных повышенных температурах имеет свои существенные особенности.

На представленных графиках, можно выделить четыре стадии деформирования: I – начальную (пригрузки); II – линейно-упругую; III – упруго-пластическую; IV – разрушения. На рисунках 2.12-2.17 границы указанных стадий показаны пунктирными линиями. Эти же стадии выделяются и при одноосном нагружении образцов каменной соли. Каждой из указанных стадий соответствуют определённые качественные изменения в структуре исследуемых образцов, что отражается на характере АЭ. Так на I стадии имеют место локальные разрушения поверхности образца, которые связаны с несовершенством его поверхности и формы. На стадии II происходит линейно-упругое деформирование образца без значимых структурных изменений в нём. Для III стадии характерны начальные процессы трещинообразования, а для IV стадии их дальнейшее развитие вплоть до разрушения. Детальное описание изменений деформаций и активности АЭ при постоянной скорости нагружения и различных температурах на каждой из стадий деформирования протяжённостью $\Delta\sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$, основанное на экспериментальных данных, которые отражены на рисунках 2.12, 2.14 и 2.16, представлено в таблице 2.4.

Изменение продольных ε_1 и объёмных ε_v деформаций в функции от девиатора σ_d напряжений носит достаточно плавный характер. На границах стадий деформирования не наблюдается каких-либо явных аномалий, которые позволили бы однозначно идентифицировать эти границы. Отметим, что такая же особенность наблюдалась и в экспериментах в одноосном напряжённом состоянии.

Дискретность и неоднородность структуры каменной соли обуславливают дискретность и неоднородность её акустической эмиссии. При трёхосном нагружении образцов по сравнению с одноосным активностью АЭ в пределах каждой стадии деформирования более стационарна и содержит существенно меньше аномальных выбросов. Физически это понятно, поскольку боковое давление препятствует трещинообразованию, повышая структурную стабильность геоматериала. В то же время на

границах между стадиями параметр \dot{N}_Σ испытывает относительно резкие изменения, позволяющие достаточно надёжно их идентифицировать по функции $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$.

Сравнивая значения активности АЭ на различных стадиях деформирования, можно отметить, что максимальные значения \dot{N}_Σ имеют место на III стадии деформирования и превышают соответствующие значения даже на IV стадии. Такая же закономерность наблюдалась и при одноосном напряженном состоянии с постоянной скоростью деформирования. Это объясняется тем, что на стадии разрушения возникают крупномасштабные дефекты, которые обуславливают сильное затухание сигналов АЭ, в результате чего часть последних не регистрируется.

С увеличением температуры максимальные значения \dot{N}_Σ увеличиваются. При этом переход от I к III сопровождается ростом значений \dot{N}_Σ и только на IV стадии \dot{N}_Σ уменьшается в рамках одного температурного режима.

При трёхосных испытаниях, как и при одноосных, увеличение температуры приводит к смещению границ между стадиями деформирования.

По положению границ между II и III, а также III и IV стадиями деформирования можно оценить относительные значения предела упругости σ_e и предела длительной прочности σ_1^∞ исследуемого образца каменной соли. Экспериментально полученные значения $\sigma_e / (\sigma_1 - \sigma_3)$ и $\sigma_1^\infty / (\sigma_1 - \sigma_3)$ при различных температурах приведены в таблице 2.4.

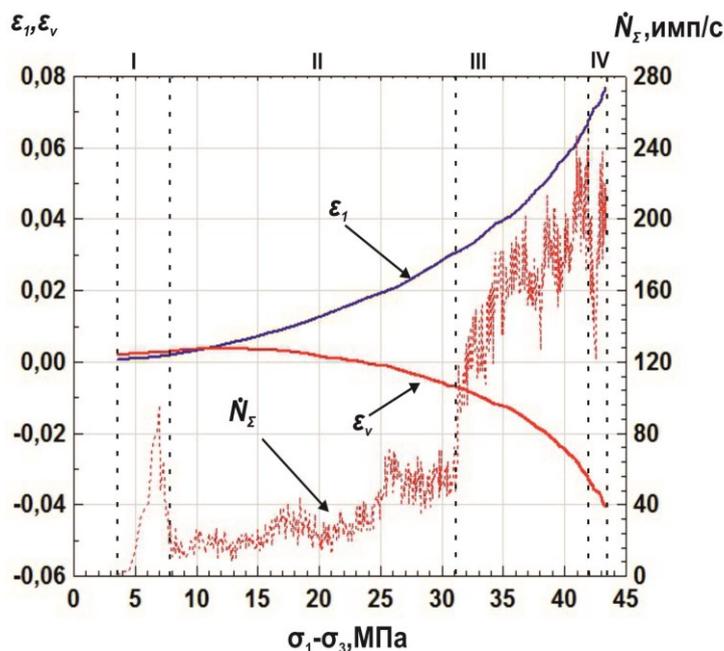


Рисунок 2.12 - Зависимости $\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$, $\varepsilon_v = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ и $\dot{N}_\varepsilon = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения и боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа при $T = 23^\circ\text{C}$

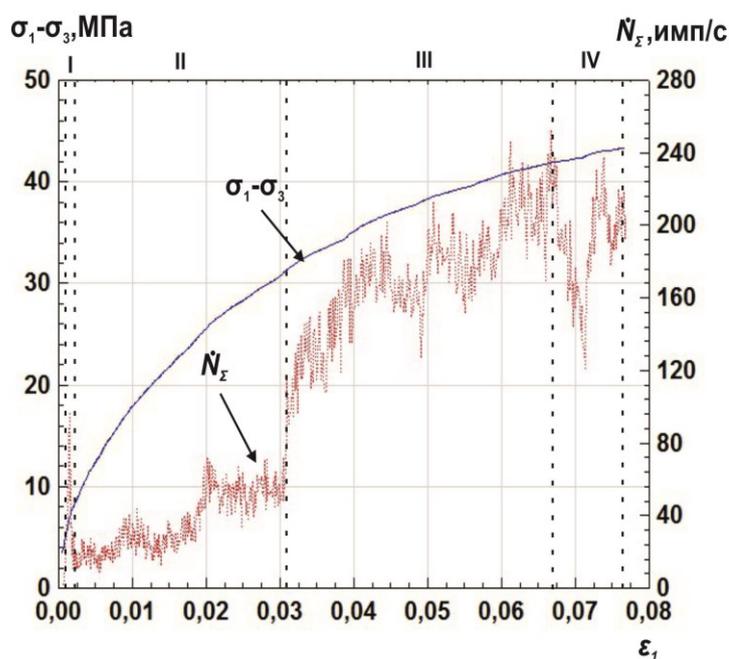


Рисунок 2.13 Зависимости $\sigma_1 - \sigma_3 = f(\varepsilon_1)$ и $\dot{N}_\varepsilon = f(\varepsilon_1)$ образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения и боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа при $T = 23^\circ\text{C}$

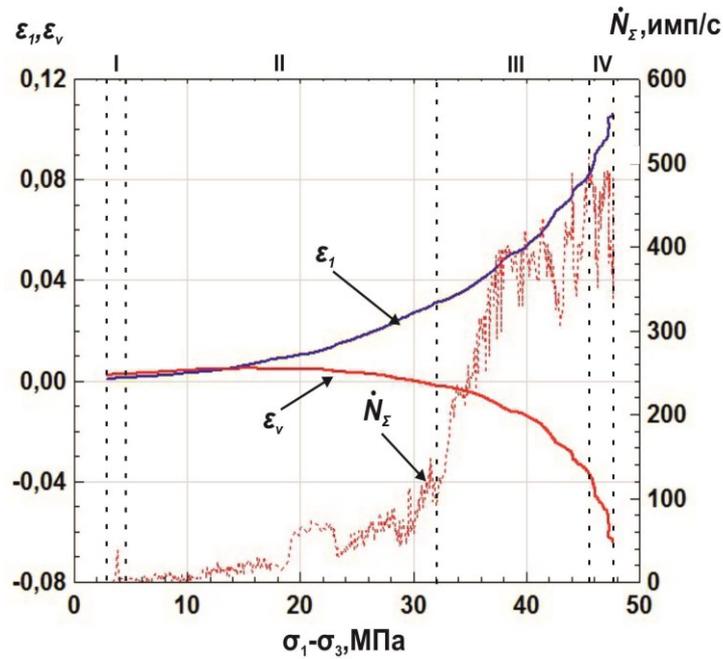


Рисунок 2.14 - Зависимости $\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$, $\varepsilon_v = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ и $\dot{N}_\varepsilon = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения и боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа при $T = 40^\circ\text{C}$

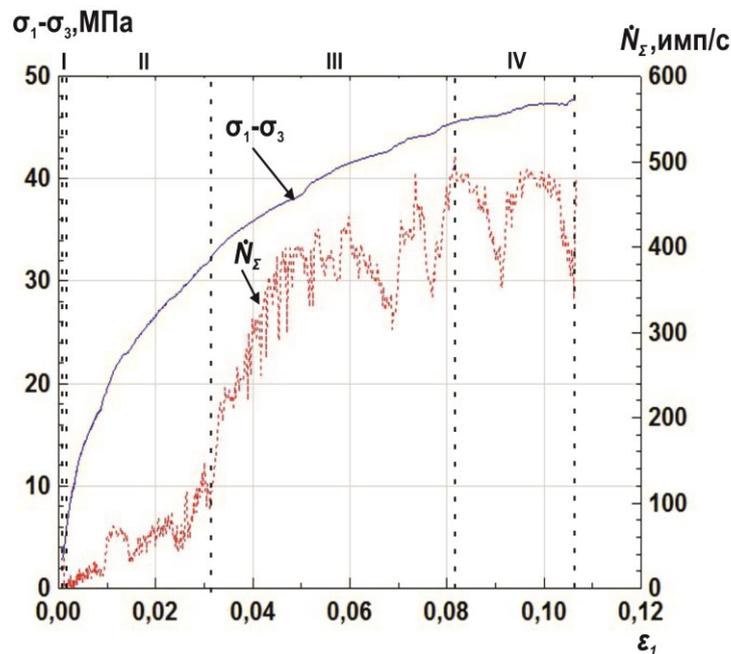


Рисунок 2.15 Зависимости $\sigma_1 - \sigma_3 = f(\varepsilon_1)$ и $\dot{N}_\varepsilon = f(\varepsilon_1)$ образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения и боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа при $T = 40^\circ\text{C}$

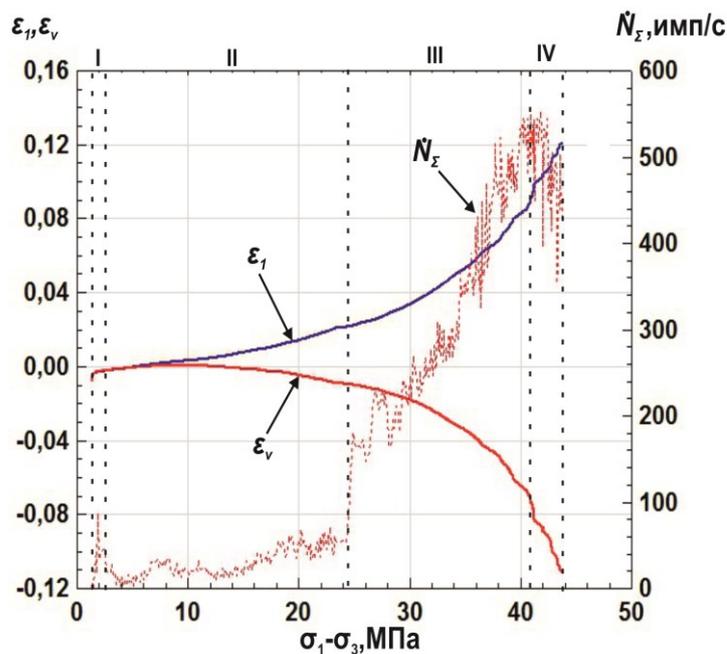


Рисунок 2.16 - Зависимости $\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$, $\varepsilon_v = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ и $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения и боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа при $T = 60^\circ\text{C}$

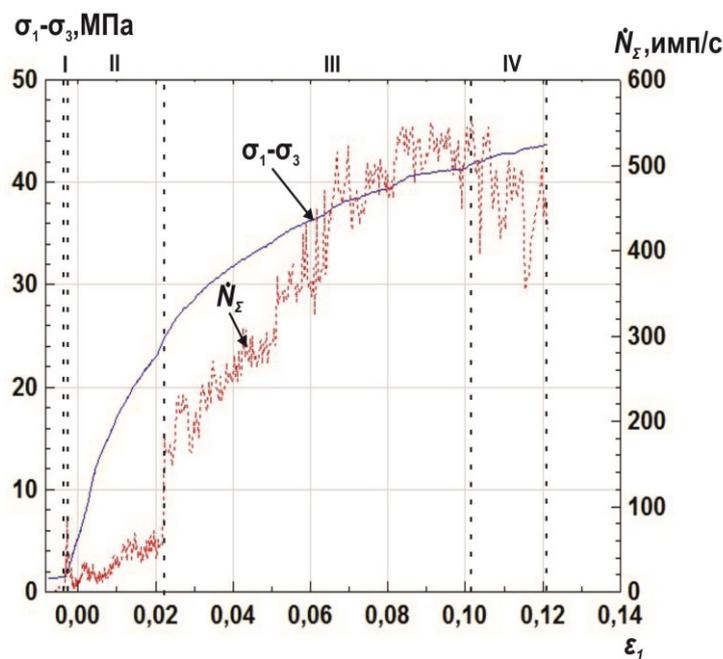


Рисунок 2.17 Зависимости $\sigma_1 - \sigma_3 = f(\varepsilon_1)$ и $\dot{N}_\Sigma = f(\varepsilon_1)$ образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения и боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$ МПа при $T = 60^\circ\text{C}$

Таблица 2.4 - Изменения деформаций и активности АЭ образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения, боковом давлении $\sigma_2=\sigma_3=5$ МПа и различных температурах T_i

$T_i, ^\circ\text{C}$	Стадии	Начальная	Линейно-упругая	Упруго пластическая	Разрушения
23	$\Delta\sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	0-0,12	0,12-0,69	0,69-0,96	0,96-1
	$\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	Отсутствие изменений	Нелинейное увеличение в 20 раз	Нелинейное увеличение в 2,3 раза	Нелинейное увеличение в 1,2 раза
	$(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	Отсутствие изменений	Нелинейное увеличение в 7 раз	Нелинейное увеличение в 3,4 раза	Нелинейное увеличение в 1,3 раза
	$\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	Скачок до 100, затем спад до 15	Нелинейное увеличение от 15 до 72	Скачок от 72 до 90, затем нелинейный рост до 260	Нелинейное уменьшение от 260 до 240
40	$\Delta\sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	0-0,04	0,03-0,64	0,64-0,93	0,93-1
	$\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	Отсутствие изменений	Нелинейное увеличение в 23 раза	Нелинейное увеличение в 2,8 раза	Нелинейное увеличение в 1,3 раза
	$(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	Отсутствие изменений	Нелинейное увеличение в 6 раз	Нелинейное увеличение в 5,6 раза	Нелинейное увеличение в 1,8 раза
	$\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	Скачок до 16, затем спад до 0	Нелинейное увеличение от 0 до 95	Скачок от 95 до 220, затем нелинейный рост до 495	Нелинейное уменьшение от 495 до 480
60	$\Delta\sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	0-0,03	0,03-0,54	0,54-0,92	0,92-1
	$\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	Отсутствие изменений	Нелинейное увеличение в 15 раз	Нелинейное увеличение в 4,2 раза	Нелинейное увеличение в 1,2 раза
	$(-\varepsilon_v) = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	Отсутствие изменений	Нелинейное увеличение в 3,5 раза	Нелинейное увеличение в 6 раз	Нелинейное увеличение в 1,6 раза
	$\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1 - \sigma_3)$	Скачок до 80, затем спад до 20	Нелинейное увеличение от 20 до 45	Скачок от 45 до 175, затем нелинейный рост до 550	Нелинейное уменьшение от 550 до 430

Таблица 2.5 - Относительные значения механических характеристик образцов каменной соли

Относительные значения механических характеристик	T=23 °C	T=40 °C	T=60 °C
$\sigma_e/(\sigma_1 - \sigma_3)$	0,69	0,64	0,54
$\sigma_1^\infty/(\sigma_1 - \sigma_3)$	0,96	0,93	0,92

Как видно из таблицы 2.5, с увеличением температуры относительные значения пределов упругости и длительной прочности уменьшаются, а сами эти значения существенно выше, чем в экспериментах при одноосном нагружении образцов.

Выводы к главе 2:

1. Представленные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что метод АЭ может рассматриваться как эффективный инструмент изучения процессов деформирования и разрушения каменной соли в различных термобарических условиях. Он позволяет идентифицировать её стадии деформирования по аномальным изменениям активности АЭ на границах между стадиями, а также определять соответствующие указанным границам механические свойства.

2. Проведённые экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что проявления АЭ образцов каменной соли, зависят как от скорости их одноосного нагружения, так и от температурных воздействий. С увеличением температуры происходит смещение относительных значений механических свойств, причем при более высокой скорости деформирования это смещение проявляется сильнее.

3. Представленные результаты свидетельствуют, о том, что проявления акустической эмиссии в процессе деформирования образцов

каменной соли при их нагружении по схеме Кармана и повышенных температурах носят более упорядоченный характер по сравнению с проявлением АЭ в экспериментах в одноосно напряжённом состоянии. По особенностям активности акустической эмиссии надёжно идентифицировать стадии деформирования и устанавливать их границы, а также по положению последних оценивать определённые механические свойства каменной соли.

4. Полученные результаты экспериментов в ходе нагружения каменной соли по схеме Кармана и в условиях повышенных температур, показывают, что при увеличении температуры наблюдается смещения относительных значений механических свойств в меньшую сторону, так же как и в экспериментах в условиях одноосного нагружения.

5. Метод акустической эмиссии обеспечивает возможность решения прогнозных задач, связанных с оценкой влияния температур и скорости деформирования каменной соли на её свойства и динамику разрушения. При проведении механических испытаний каменной соли акустико-эмиссионные измерения могут быть использованы как самостоятельно, так и выступать в качестве важного дополнения к традиционным деформационным измерениям, расширяя возможности последних. Важно также, что благодаря дистанционному характеру акустико-эмиссионных измерений, существуют потенциальные возможности реализации метода АЭ непосредственно в массиве

Глава 3. Акустико-эмиссионные и деформационные характеристики образцов каменной соли в условиях одноосного и трёхосного напряженного состояния и ступенчато возрастающего термического воздействия

3.1 Акустико-эмиссионные и деформационные характеристики образцов каменной соли в условиях одноосного напряженного состояния и ступенчато возрастающего термического воздействия

Объектом исследования являлась выборка из 27-ти близких по структуре и текстуре цилиндрических образцов практически чистой каменной соли Тульского месторождения высотой 120 мм и диаметром 60 мм. Литологическое описание и усреднённые физико-механические характеристики образцов каменной соли Тульского месторождения приведено в главе 2. Предварительно проведенное цензурирование ультразвуковым время-импульсным методом гарантировало, что все входящие в выборку образцы были относительно однородны, так как скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в них различались не более чем на 3 %.

Выборка была разделена на 3 группы, каждая из которых состояла из 9-ти образцов, подвергаемых одинаковым режимам механического и термического нагружения. Таким образом, осуществлялось дублирование соответствующего эксперимента, результаты которого принимались за истинные при условии, что для образцов одной группы качественно они полностью совпадали. Поскольку такое совпадение действительно имело место, то ниже приводятся экспериментальные данные, полученные только на одном из образцов каждой группы, подробно описание результатов исследований приведено в работе [114].

Образцы 1-й группы подвергались квазистатическому одноосному нагружению до уровня $\sigma_1=18$ МПа, второй группы – до $\sigma_2=19$ МПа и третьей группы – до $\sigma_3=20$ МПа. Затем каждый образец ступенчато с шагом 10 °С

нагревался в диапазоне температур от 20 до 80 °С. При этом длительность ступени составляла 24 часа.

В ходе каждого эксперимента измерялись испытываемые образцом температуры T и одноосное напряжение σ_1 , активность \dot{N}_Σ возникающей под их влиянием акустической эмиссии, а также продольные ε_1 и поперечные $\varepsilon_2=\varepsilon_3$ деформации, по которым рассчитывалась интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_{i=\frac{2}{\sqrt{3}}} * (\varepsilon_1 - \varepsilon_3). \quad (3.1)$$

Экспериментальные исследования проводились с использованием измерительного комплекса на основе установки длительного сжатия УДС 65/80, блок – схема которого представлена на рисунке 3.1.

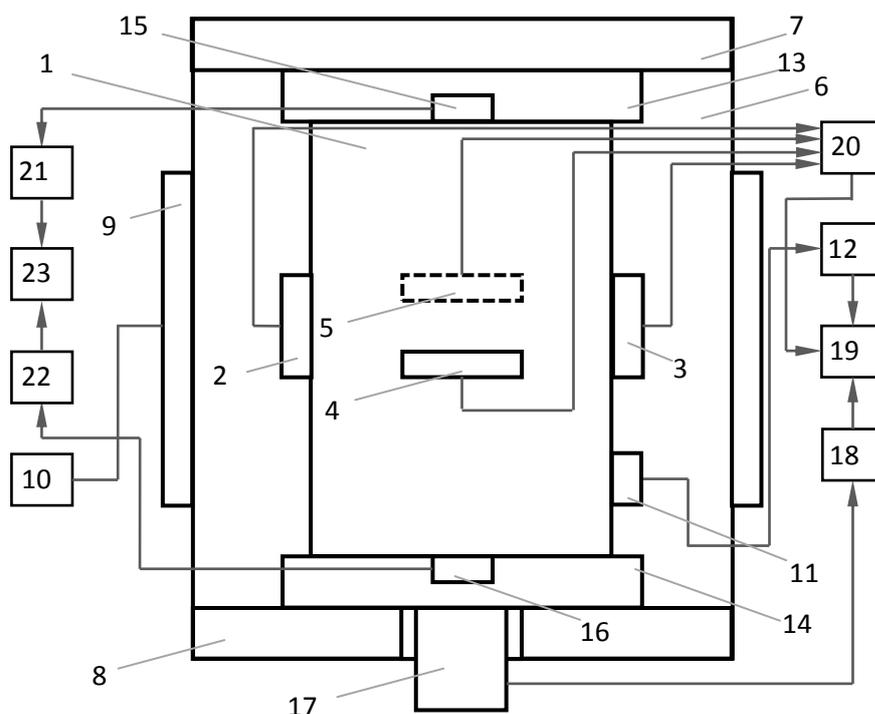


Рисунок 3.1 - Блок-схема установки для измерения и регистрации напряжений, деформаций и акустической эмиссии при одноосном нагружении и нагревании образцов каменной соли

Образец 1 каменной соли в резиновой оболочке с установленными на нём симметрично тензometрами продольных 2, 3 и поперечных 4, 5 деформаций помещался в заполненную маслом цилиндрическую камеру 6 с верхней крышкой 7 и нижней крышкой 8. Нагрев камеры 6 осуществлялся с помощью расположенного по её образующей кольцевого управляемого электронагревательного элемента 9, подключенного к программируемому блоку 10 управления температурой. Температура образца 1 измерялась закреплённой на нём термопарой 11, подключённой к терморегистратору 12. Своими торцевыми поверхностями образец 1 прижимался к верхнему 13 и нижнему 14 защитным корпусам, в которых размещались приемные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) акустической эмиссии (АЭ) 15 и 16. Верхний защитный корпус 13 упирался в крышку 7 камеры 6. Давление на нижний корпус 14 (и соответственно на образец) производилось поршнем 17 силовой установки, измерялось датчиком давления 18, а затем регистрировалось ЭВМ 19 с программным обеспечением A-stest. Тензometры 2, 3 и 4, 5, входящие попарно в измерительные мосты тензостанции 20, обеспечивали измерение деформаций, которые затем регистрировались и обрабатывались ЭВМ 19, к которой был подключен также терморегистратор 12. Сигналы АЭ с ПЭП 15 и 16 после их усиления предусилителями 21 и 22 поступали на акустико-эмиссионную измерительную систему 23 (A-line 32 D).

По результатам проведённых экспериментов были получены представленные на рисунках 3.2, 3.4 и 3.6 зависимости, отражающие изменения относительных продольных деформаций ε_l и активности АЭ \dot{N}_Σ в функции от времени t и температуры T для трёх различных значений осевых напряжений σ_1 . И на рисунках 3.3, 3.5 и 3.7 зависимости, отражающие изменения интенсивности деформаций ε_i и активности АЭ \dot{N}_Σ в функции от времени t и температуры T для трёх различных значений осевых напряжений σ_1 .

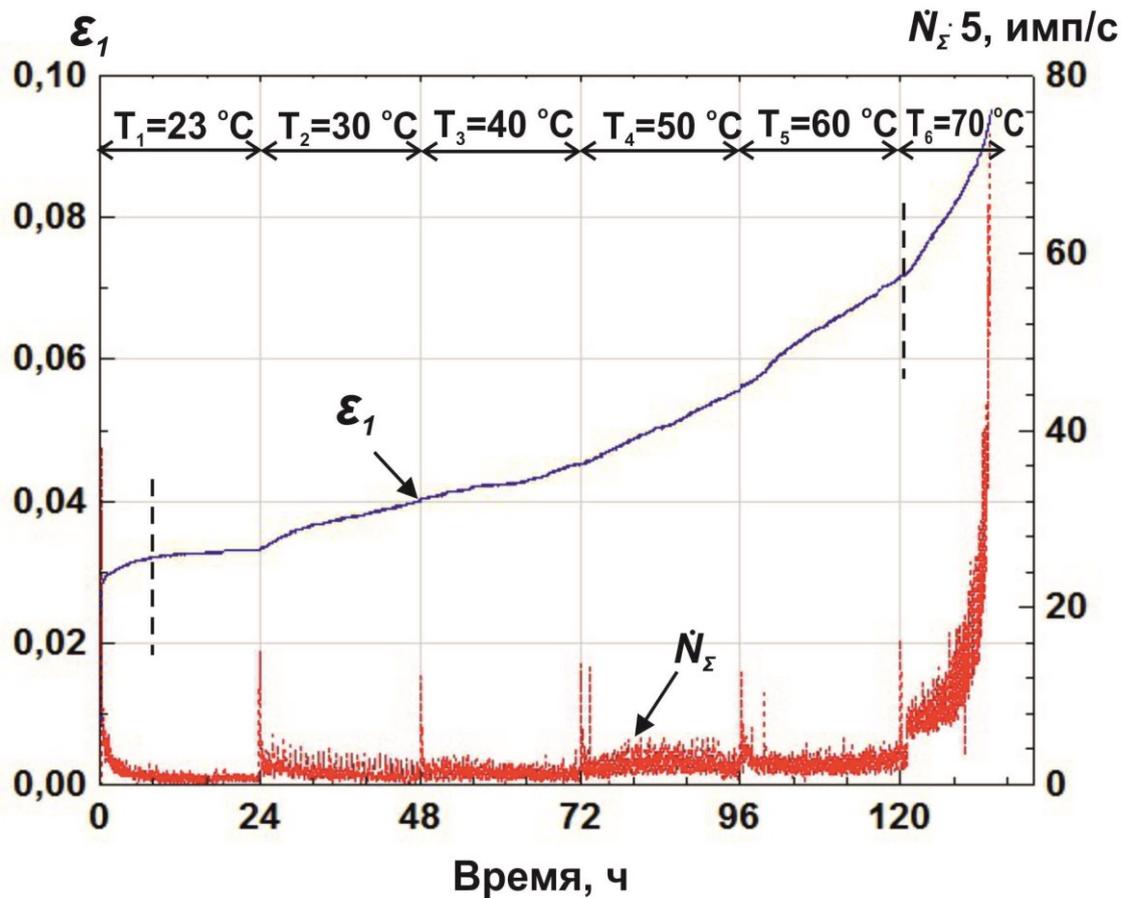


Рисунок 3.2 - Графики изменения продольных относительных деформаций ϵ_1 и активности АЭ N_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1 = 18$ МПа

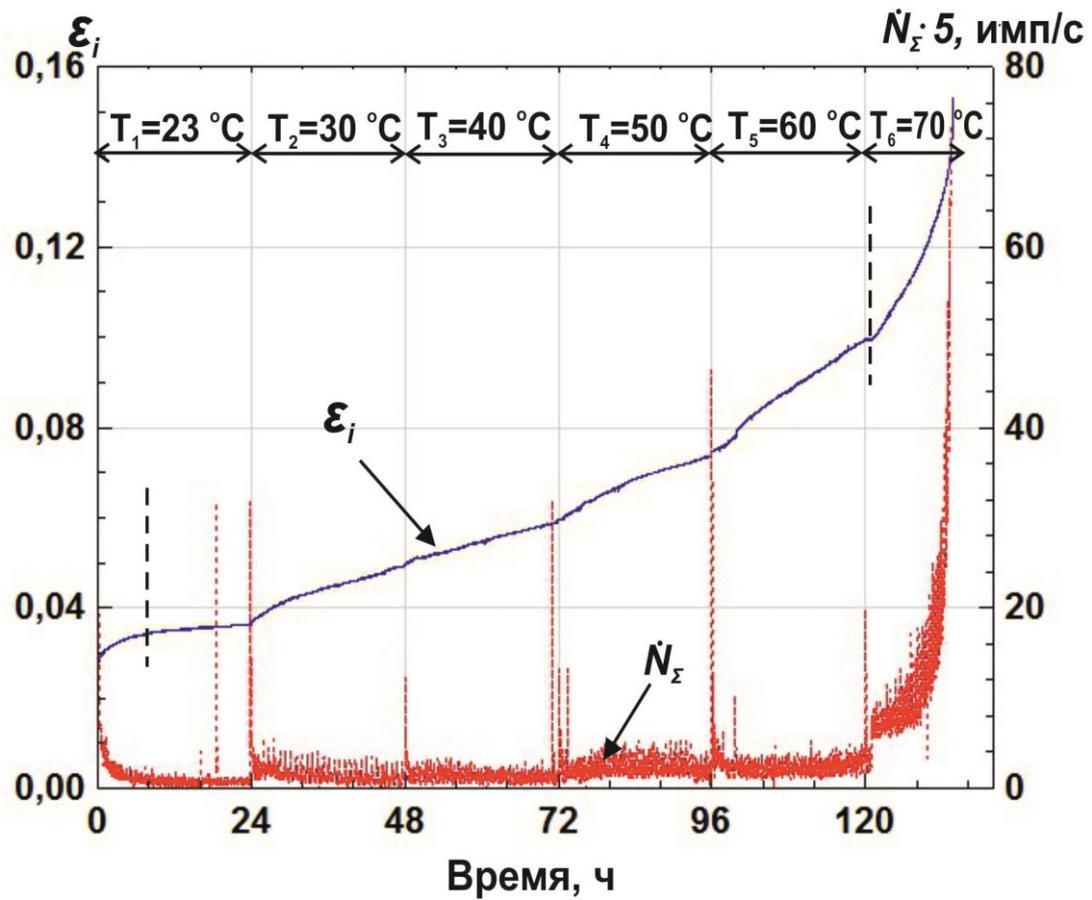


Рисунок 3.3- Графики интенсивности деформаций ϵ_i и активности АЭ N_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1 = 18$ МПа

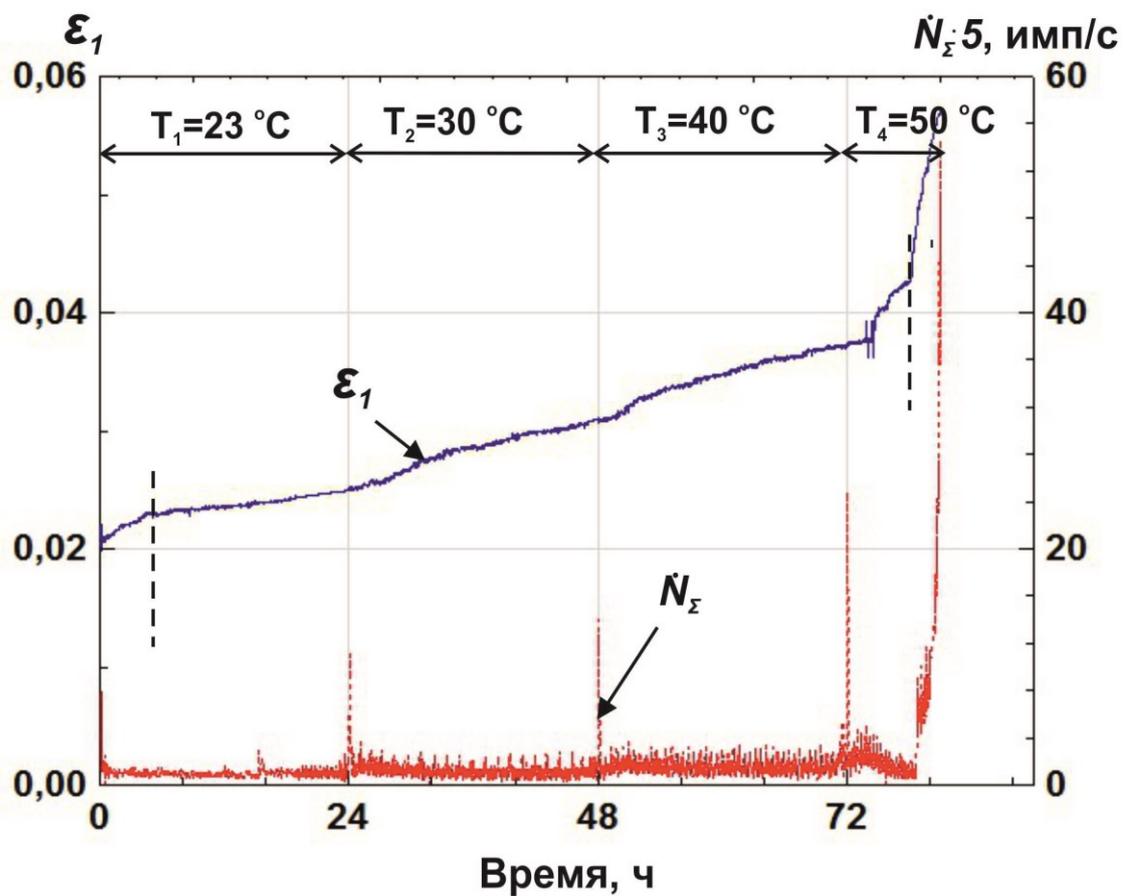


Рисунок 3.4 - Графики изменения продольных относительных деформаций ϵ_1 и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1 = 19$ МПа

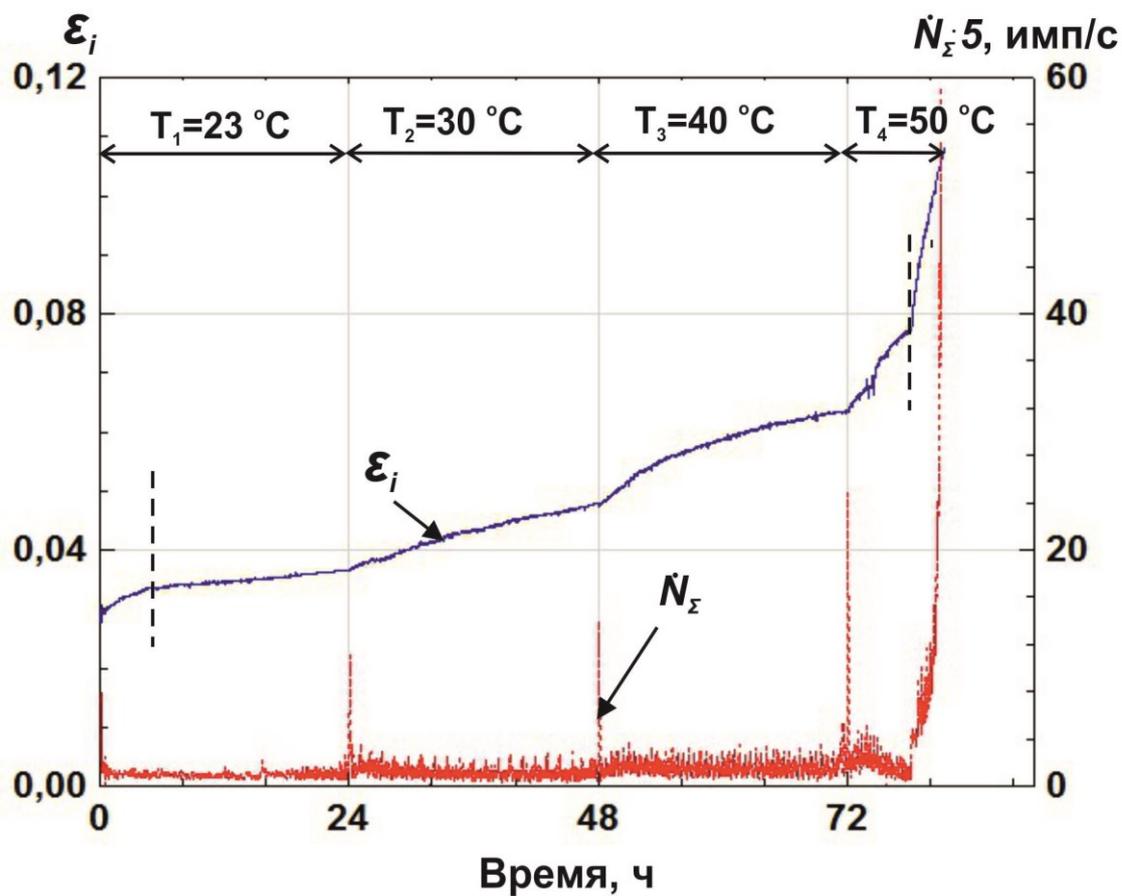


Рисунок 3.5 - Графики изменения интенсивности деформаций ϵ_i и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1 = 19 \text{ МПа}$

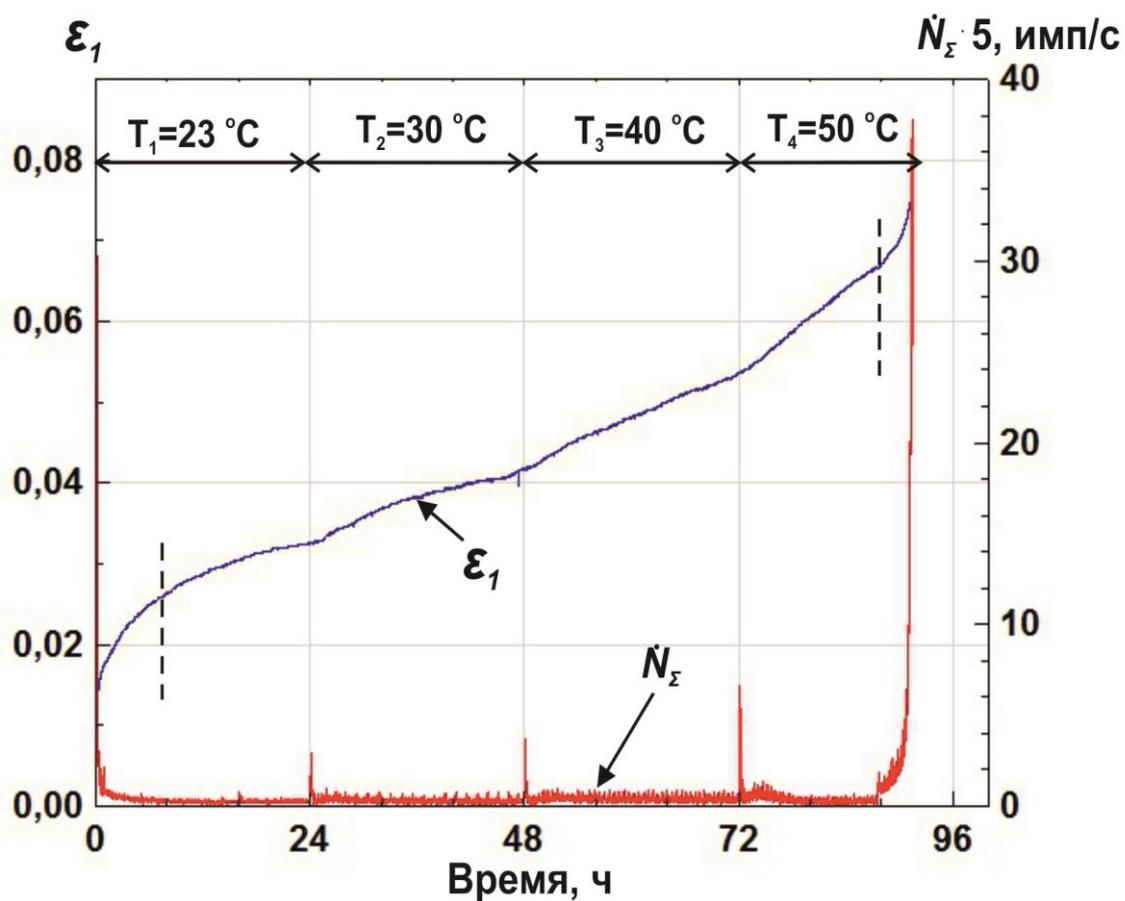


Рисунок 3.6 изменения продольных относительных деформаций ϵ_1 и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1 = 20$ МПа

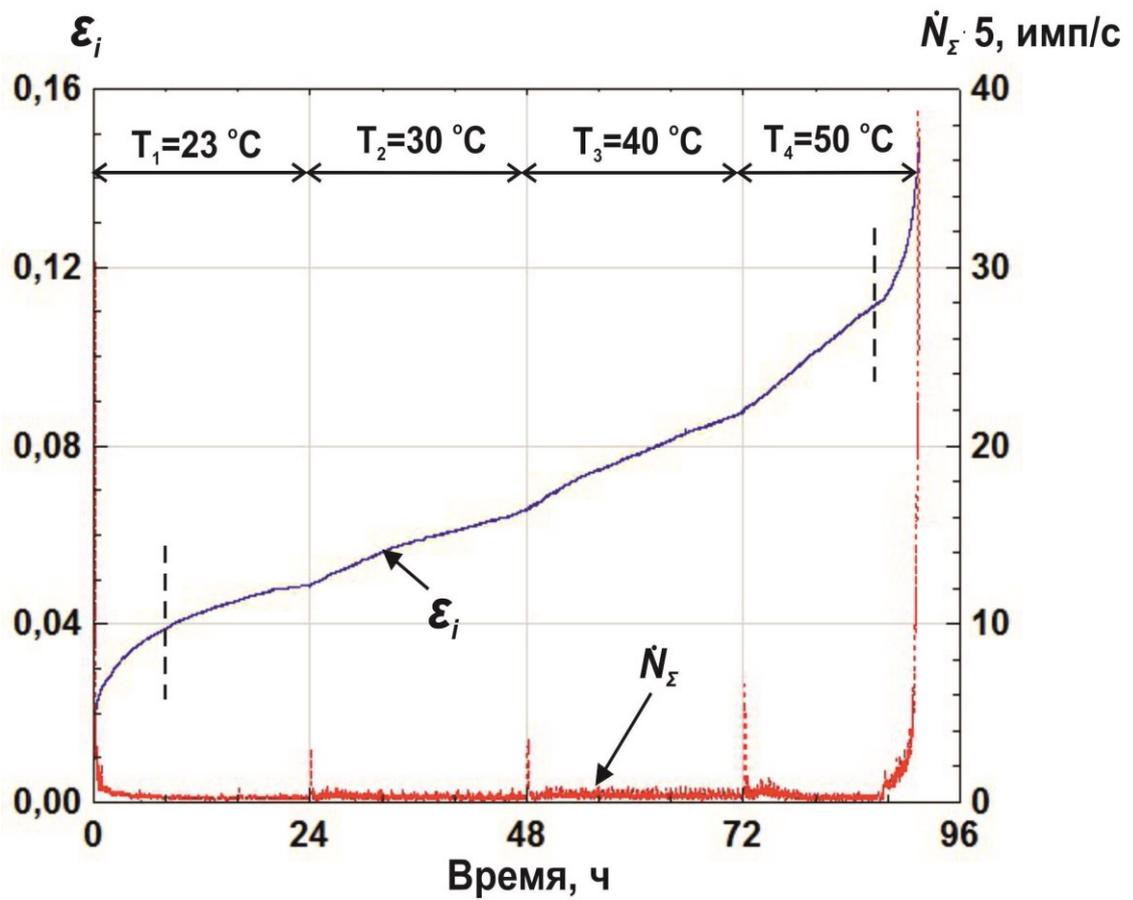


Рисунок 3.7 - Графики изменения интенсивности деформаций ϵ_i и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1 = 20 \text{ МПа}$

Анализ этих зависимостей показывает, что даже при $\sigma_1 = \text{const}$, характер и значения параметров ε_l и ε_i и \dot{N}_Σ с увеличением температуры изменяются, что связано с её влиянием на пластичность каменной соли. Причём, на всех температурных ступенях, кроме последней, степень указанных изменений существенно больше для величин ε_l и ε_i нежели для \dot{N}_Σ .

С переходом на каждую последующую ступень температурного воздействия крутизна S зависимостей $\varepsilon_l = f(T, \sigma_1 = \text{const})$ и $\varepsilon_i = f(T, \sigma_1 = \text{const})$ возрастает. На всех указанных ступенях, кроме первой и последней, такое возрастание относительно линейно. Поэтому количественно его можно оценить углом α наклона касательной к кривым $\varepsilon_l = f(T)$ и $\varepsilon_i = f(T)$ в точке, соответствующей центру каждой ступени, для которой $T_i = \text{const}$. На первой и последней температурных ступенях графики $\varepsilon_l = f(T)$ и $\varepsilon_i = f(T)$ носят ярко выраженный нелинейный характер. В связи с этим каждый из временных интервалов, соответствующих первой и последней температурной стадии, на рисунках 3.2-3.7 разделён пунктирной линией на два подинтервала (начальный и конечный) и соответствующая касательная строилась только по отношению к центру конечного интервала. Значения углов α , полученных путем проведения касательных к кривым $\varepsilon_i = f(T)$ для различных величин σ_1 и температурных интервалов, а также средние за соответствующий температурный интервал значения активности АЭ $\dot{N}_{\Sigma cp}$ приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Углы, характеризующие крутизну деформационных кривых, и средняя активность АЭ на различных температурных ступенях

Напряжение, σ_1 , МПа	Температура T , °С	Угол α , град	Средняя активность $\dot{N}_{\Sigma cp}$, имп/с
18	$T_1=23$	8	0,23
	$T_2=30$	13	0,30
	$T_3=40$	14	0,32
	$T_4=50$	18	0,5
	$T_5=60$	28	0,53
	$T_6=70$	55	35
19	$T_1=23$	8	0,23
	$T_2=30$	12	0,3
	$T_3=40$	15	0,33
	$T_4=50$	60	28
20	$T_1=23$	8	0,2
	$T_2=30$	19	0,23
	$T_3=40$	20	0,27
	$T_4=50$	60	20

Как видно из рисунков 3.3, 3.5 и 3.7 и данных таблицы 3.1, на стадии устойчивой ползучести изменение параметров α и $\dot{N}_{\Sigma cp}$ относительно не велико. При $\sigma_1=18$ МПа переход образцов каменной соли к прогрессирующей ползучести происходит на температурной ступени 70 °С, а начиная с $\sigma_1=19$ МПа, такой переход наблюдается на ступени 50 °С. Причём, он сопровождается скачкообразным увеличением, как угла α , так и среднего значения активности АЭ $\dot{N}_{\Sigma cp}$. Учитывая, что в пределах каждой группы образцов значение $\sigma_1=const$, можно считать, что все изменения параметров α и $\dot{N}_{\Sigma cp}$ связаны только с термическим воздействием. На последнем температурном интервале такое воздействие вызывает триггерный эффект, проявляющийся переходом от установившейся к прогрессирующей ползучести. При $\sigma_1=18$ МПа такой переход сопровождается увеличением параметра α почти вдвое, а $\dot{N}_{\Sigma cp}$ более, чем в 60 раз. При $\sigma_1=19$ МПа и

переходе к прогрессирующей ползучести параметр α возрастает втрое, а $\dot{N}_{\Sigma cp}$ более, чем в 80 раз. При $\sigma_1=20$ МПа такой переход сопровождается ростом параметра α примерно вдвое, а $\dot{N}_{\Sigma cp}$ более, чем в 70 раз.

Таким образом, переход от устойчивой к прогрессирующей ползучести сопровождается существенно большими изменениями акустико-эмиссионного информативного параметра $\dot{N}_{\Sigma cp}$, чем деформационного α . На стадии устойчивой ползучести абсолютные значения \dot{N}_{Σ} при всех уровнях σ_1 достаточно малы и не превышают 0,53 имп/с. Это связано с кооперативным влиянием на деформирование образца и дефектообразование в нём факторов времени, термического и механического нагружения. Первый из них способствует проявлениям текучести каменной соли даже при относительно небольших напряжениях, второй - с одной стороны, создаёт дополнительные термонапряжения, а с другой, значительно увеличивает пластичность, благодаря которой деформирование не сопровождается разрушением, третий - создаёт статическое напряжённо-деформированное состояние образца. Наблюдаемые на границах температурных ступеней скачки активности АЭ \dot{N}_{Σ} обусловлены резким изменением температуры и, как следствие, пластичности соли и скорости её деформирования. Однако в силу кратковременности этих скачков на величину $\dot{N}_{\Sigma cp}$ заметного влияния они не оказывают.

Перспективность использования акустико-эмиссионных измерений для установления момента перехода каменной соли от стадии установившейся к стадии прогрессирующей ползучести наглядно иллюстрируется представленными на рисунках 3.8-3.10 зависимостями $\varepsilon_i(t)$ и $\dot{N}_{\Sigma}(t)$ на температурной ступени $T=70$ °С, $T=50$ °С и $T=50$ °С, которые получены в условиях одноосного нагружения при $\sigma_1=18$ МПа, $\sigma_1=19$ МПа и $\sigma_1=20$ МПа соответственно.

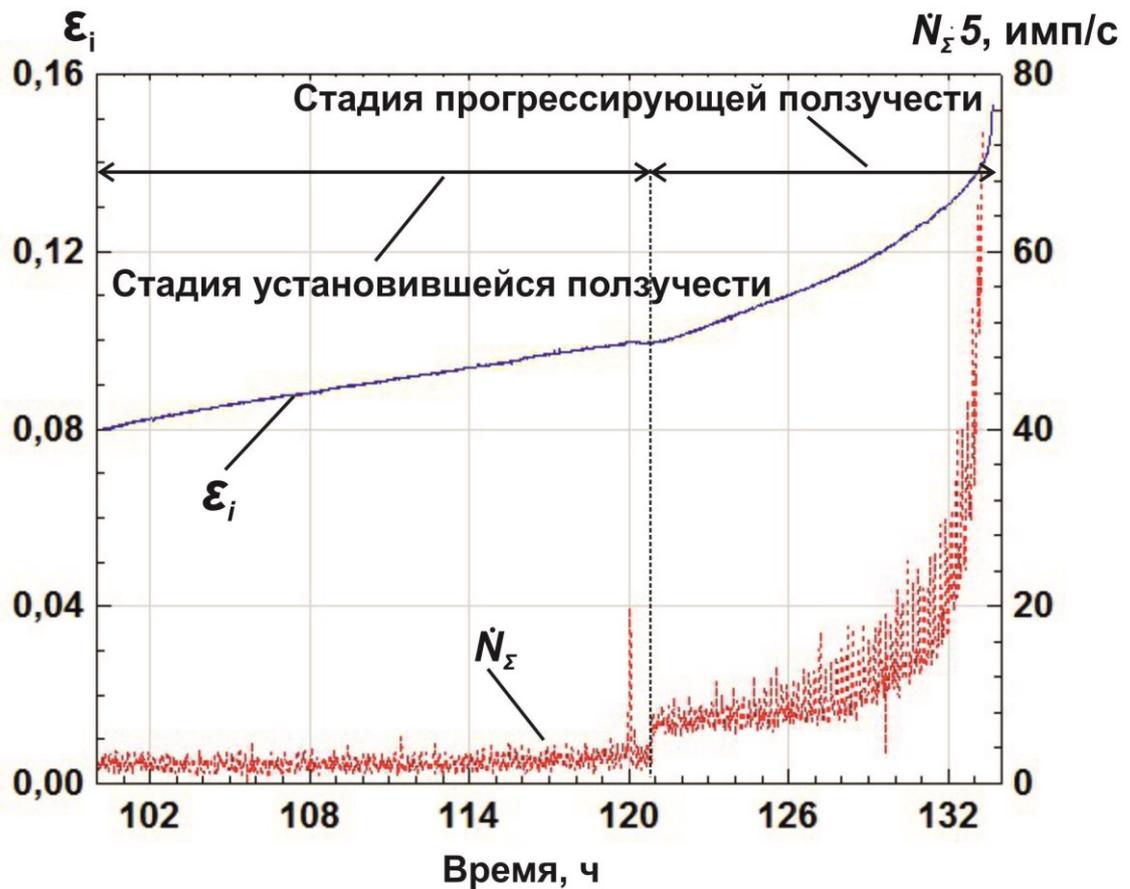


Рисунок 3.8- Графики изменения интенсивности деформаций ϵ_i и активности АЭ N_{Σ} в образце каменной соли при постоянном значении температуры $T=70^{\circ}\text{C}$ и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1 = 18 \text{ МПа}$

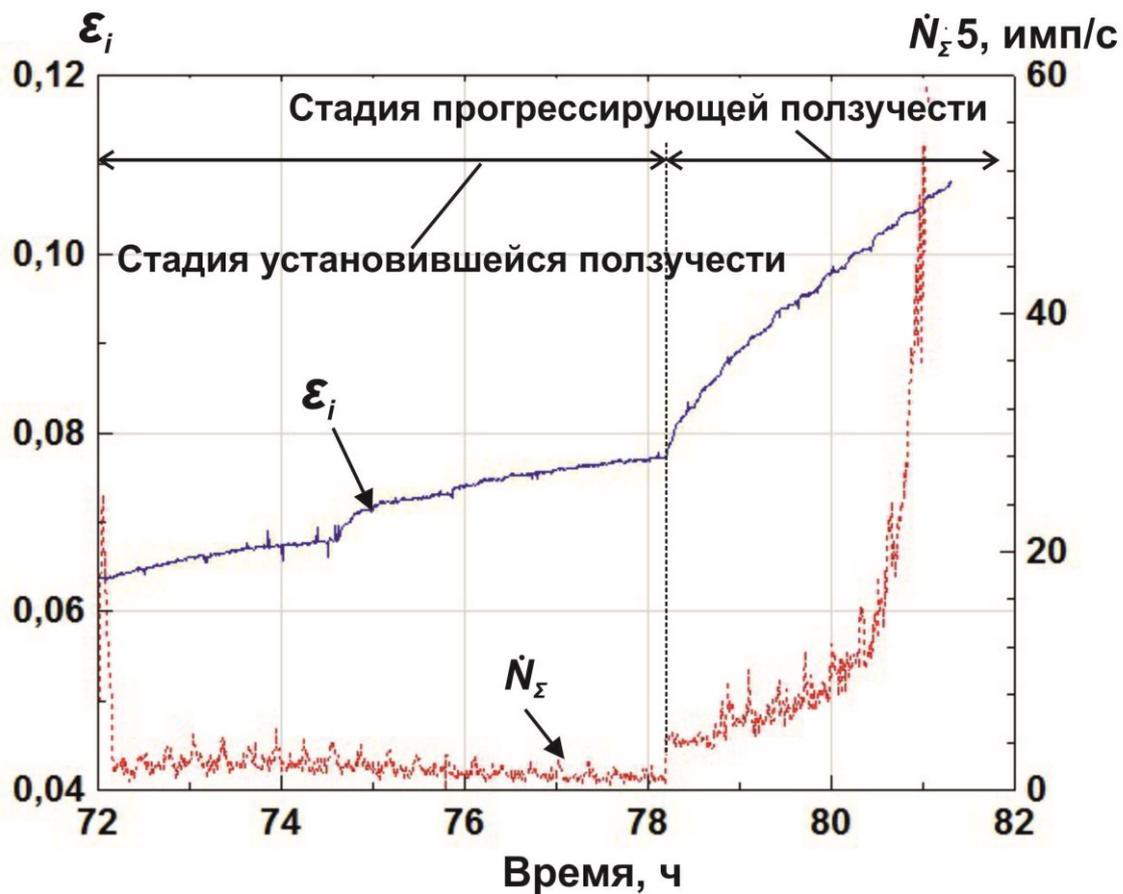


Рисунок 3.9 - Графики изменения интенсивности деформаций ϵ_i и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при постоянном значении температуры $T=50^\circ\text{C}$ и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1=19\text{ МПа}$

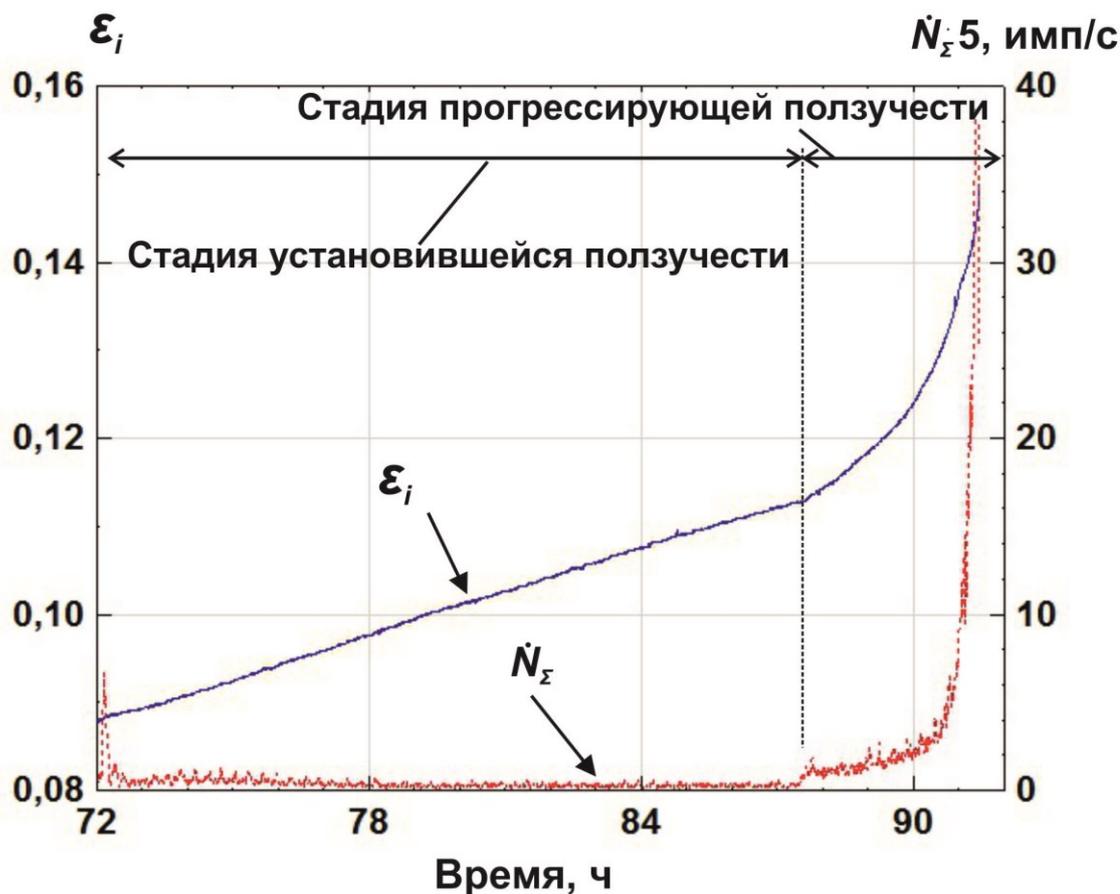


Рисунок 3.10 - Графики изменения интенсивности деформаций ϵ_i и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при постоянном значении температуры $T=50^\circ\text{C}$ и одноосном напряженном состоянии $\sigma_1=20\text{ МПа}$

На границе между указанными стадиями величина $\dot{N}_\Sigma(t)$ скачкообразно возрастает примерно вдвое, продолжая затем быстро увеличиваться. Это позволяет довольно точно установить момент достижения указанной границы, используя реализуемый современной аппаратурой пороговый принцип измерения активности АЭ. Очевидно, что этот момент может быть установлен и по точке перехода от линейного к нелинейному участку зависимости $\epsilon_i(t)$. Однако, для этого потребовалось бы регистрировать всю указанную зависимость и использовать для получения искомой информации

относительно сложные технические решения. Кроме того, следует иметь в виду, что акустико-эмиссионные измерения в отличие от деформационных, обеспечивают интегральный анализ состояния всего исследуемого объекта, относительно легко могут быть реализованы дистанционно и в режиме мониторинга. Это имеет первостепенное значение при проведении соответствующих измерений непосредственно в массиве соляных горных пород.

3.2 Акустико-эмиссионные и деформационные характеристики образцов каменной соли в условиях сложнапряженного состояния и ступенчато возрастающего термического воздействия

Объектом исследования являлись образцы из одной выборки в количестве 27 штук высотой 100 мм и диаметром 50 мм, отобранные из Калининградского месторождения. Образцы были подобраны близкие по текстурным и структурным признакам. Подробное описание и усредненные физико-механические свойства образцов каменной соли Калининградского месторождения приведены в главе 2. Все образцы были подвергнуты ультразвуковому цензурированию, которое показало, что все они относительно однородны, так как скорости распространения продольных и поперечных упругих волн в них различались не более, чем на 3 %.

Выборка была разделена на 3 группы, каждая из которой состояла из 9-ти образцов. Каждая группа подвергалась одинаковым режимам механического и термического нагружения.

Образцы каждой группы подвергались трехосному нагружению при трех различных осевых напряжениях ($\sigma_1 = 20$ МПа для первой группы, $\sigma_1 = 25$ МПа для второй группы и $\sigma_1 = 30$ МПа для третьей группы) и постоянном боковом $\sigma_3 = 5$ МПа для всех трех групп образцов каменной соли. Затем в испытаниях, где осевое напряжение составляло $\sigma_1 = 20$ МПа и $\sigma_1 = 25$ МПа, образцы нагревались ступенчато с шагом в 20 °С в диапазоне температур от 20 до 80 °С, а в испытании, где $\sigma_1 = 30$ МПа диапазон температур составлял от

20 до 60 °С с таким же температурным шагом. Длительной каждой ступени у всех групп образцов составляла 24 часа.

В ходе эксперимента постоянно регистрировались действующие осевые σ_1 и боковые напряжения σ_3 , возникающие под их влиянием продольные ε_1 и поперечные $\varepsilon_2=\varepsilon_3$ деформации, а также активность акустической эмиссии \dot{N}_Σ . По значениям ε_1 и $\varepsilon_2=\varepsilon_3$ по формуле 3.1 рассчитывалась интенсивность деформаций ε_i .

Экспериментальные исследования проводились с использованием, измерительного комплекса на основе установки длительного сжатия УДС 65/80, блок-схема которого представлена на рисунке 2.11. Подробное описание измерительного комплекса приведено в главе 2.

По результатам экспериментов были получены представленные на рисунках 3.11, 3.13 и 3.15. зависимости, отражающие изменения относительных продольных деформаций ε_1 и активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ в функции от времени t и температуры T в условиях трехосного сжатия при трех различных осевых напряжениях σ_1 и постоянном боковом $\sigma_3=5$ МПа. На графиках 3.12, 3.14 и 3.16 представлены зависимости, отражающие изменения интенсивности деформации ε_i и активности акустической эмиссии \dot{N}_Σ в функции от времени t и температуры T в условиях трехосного сжатия при трех различных осевых напряжениях и постоянном боковом $\sigma_3=5$ МПа.

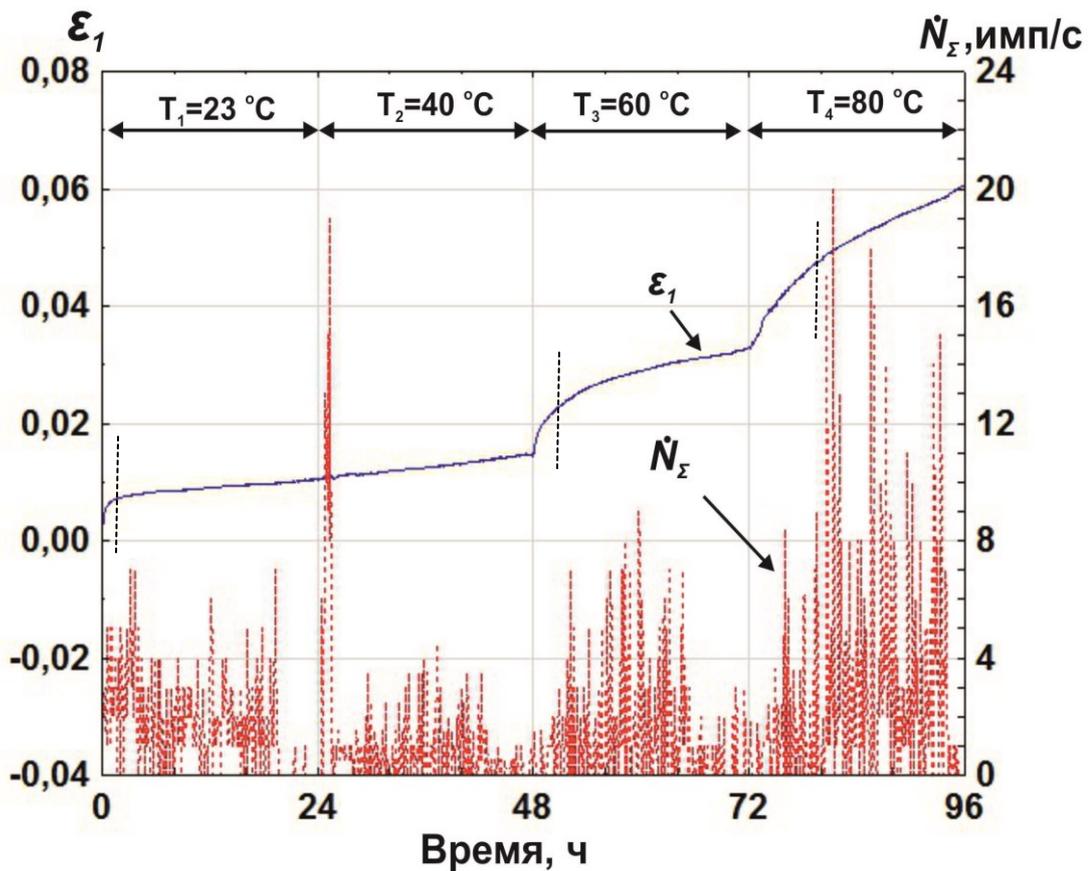


Рисунок 3.11 - Графики изменения относительных продольных деформаций ε_1 и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и трёхосном напряженном состоянии с осевым $\sigma_1=20$ МПа и боковым $\sigma_3=5$ МПа напряжениями

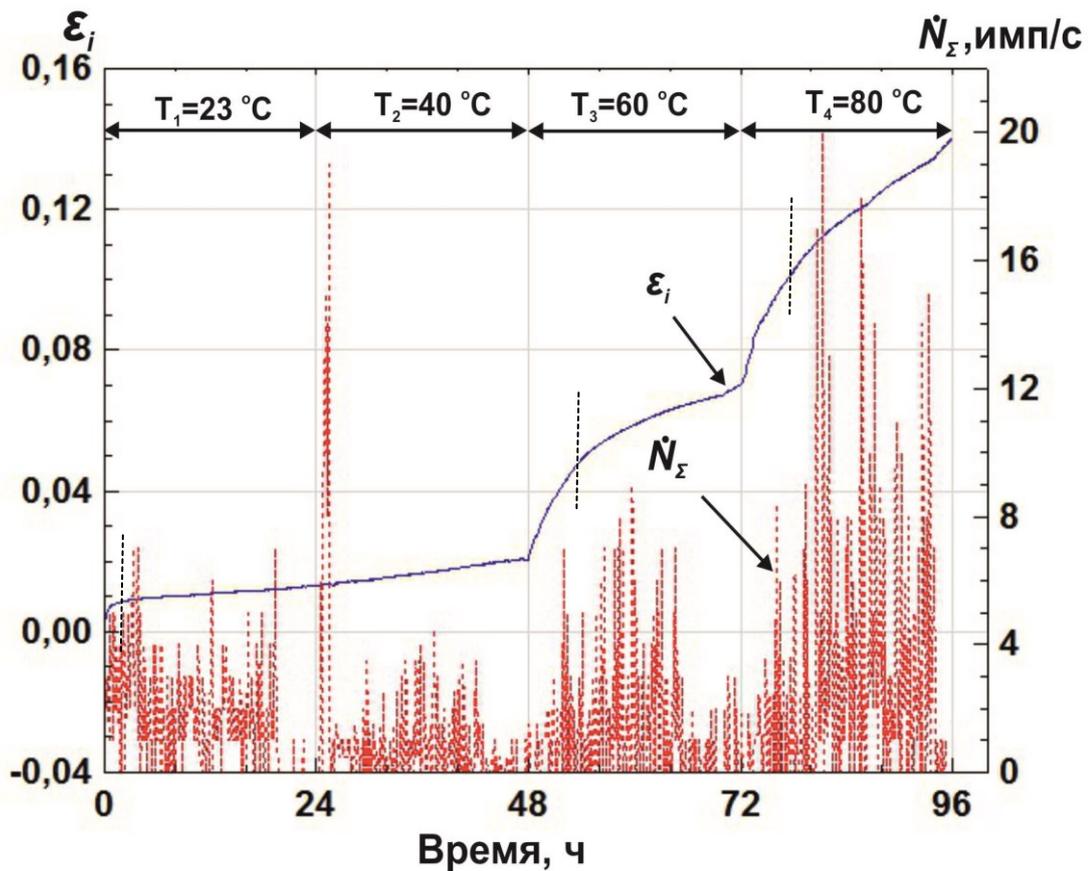


Рисунок 3.12 - Графики изменения интенсивности деформаций ε_i и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и трёхосном напряжённом состоянии с осевым $\sigma_1=20$ МПа и боковым $\sigma_3=5$ МПа напряжениями

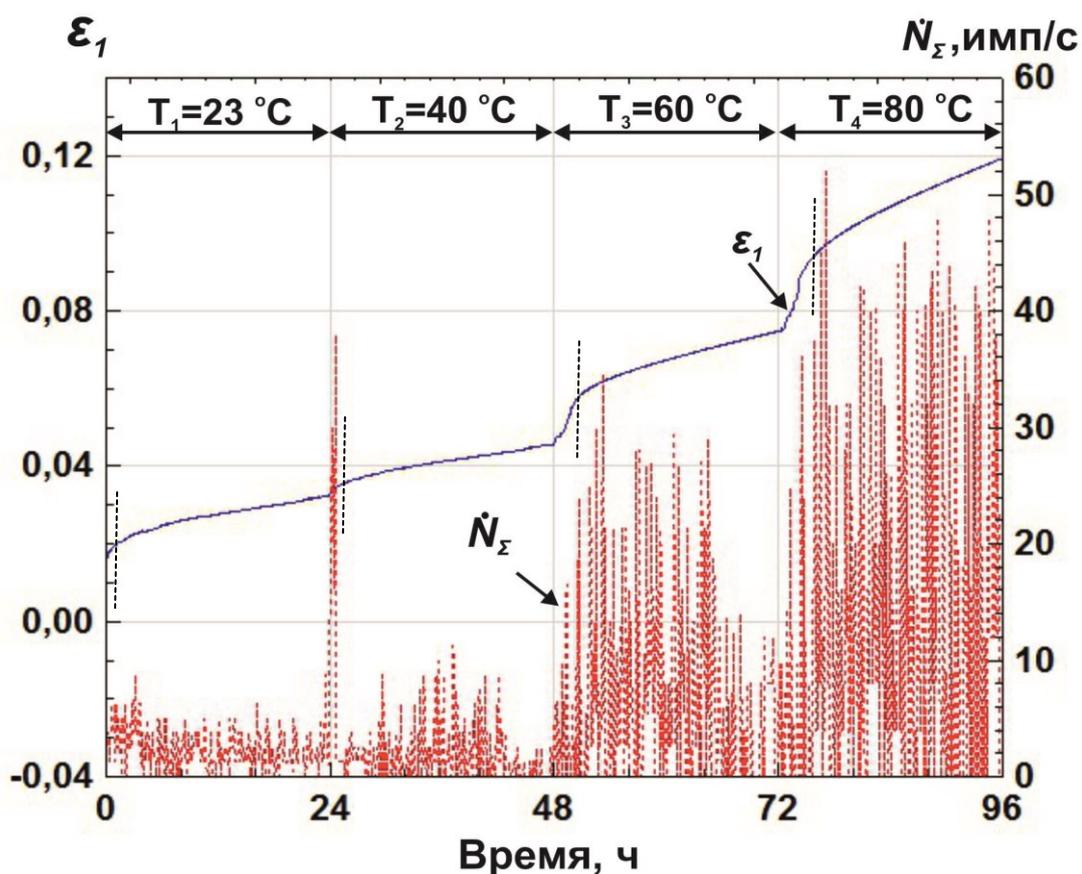


Рисунок 3.13 - Графики изменения относительных продольных ϵ_1 и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и трёхосном напряженном состоянии с осевым $\sigma_1=25$ МПа и боковым $\sigma_3=5$ МПа напряжениями

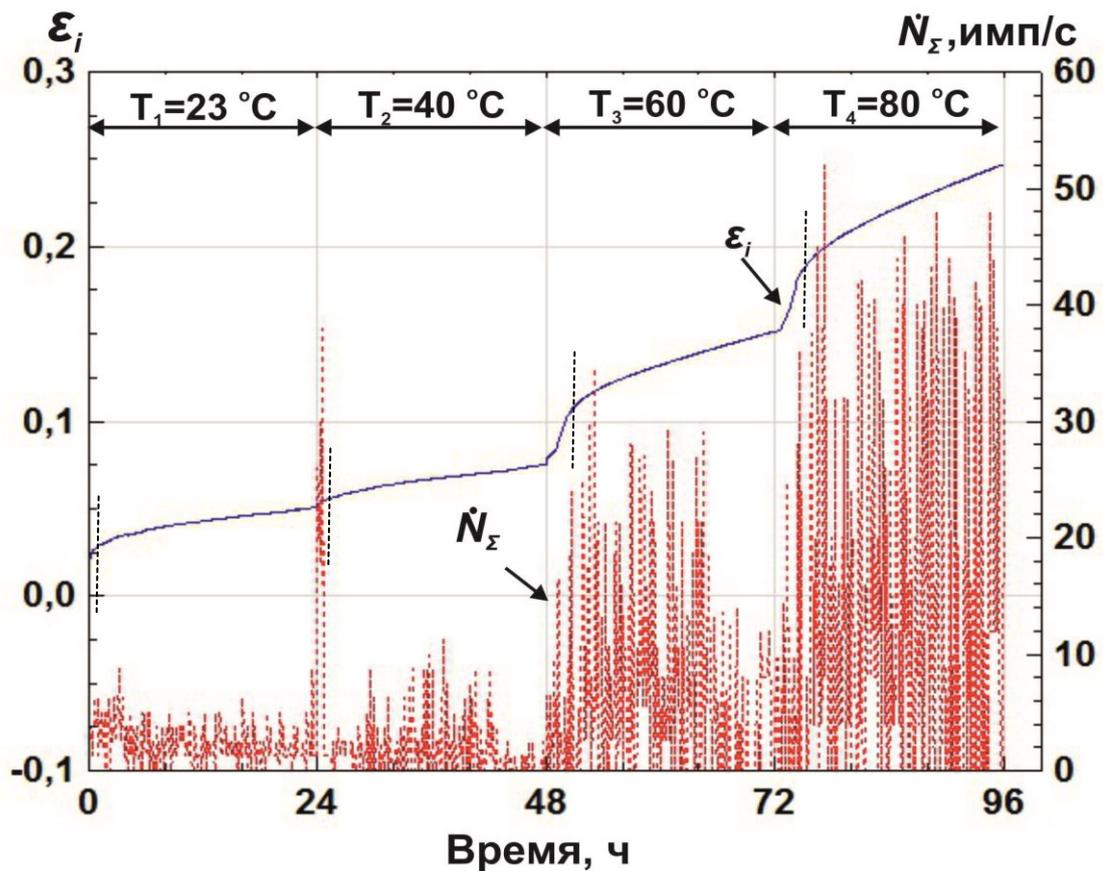


Рисунок 3.14 - Графики изменения интенсивности деформаций ϵ_i и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и трёхосном напряженном состоянии $\sigma_1=25$ МПа и $\sigma_3=5$ МПа

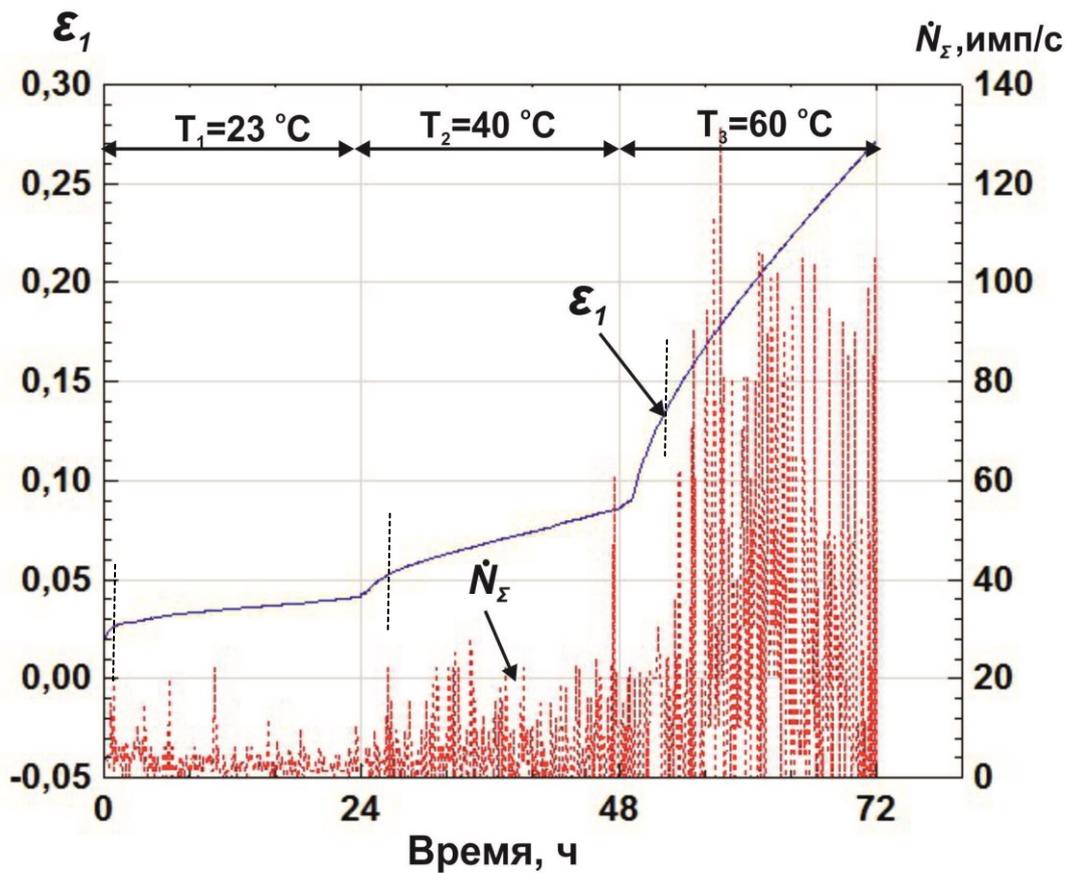


Рисунок 3.15 - Графики изменения относительных продольных ϵ_1 деформаций и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и трёхосном напряженном состоянии с осевым $\sigma_1=30$ МПа и боковым $\sigma_3=5$ МПа напряжениями

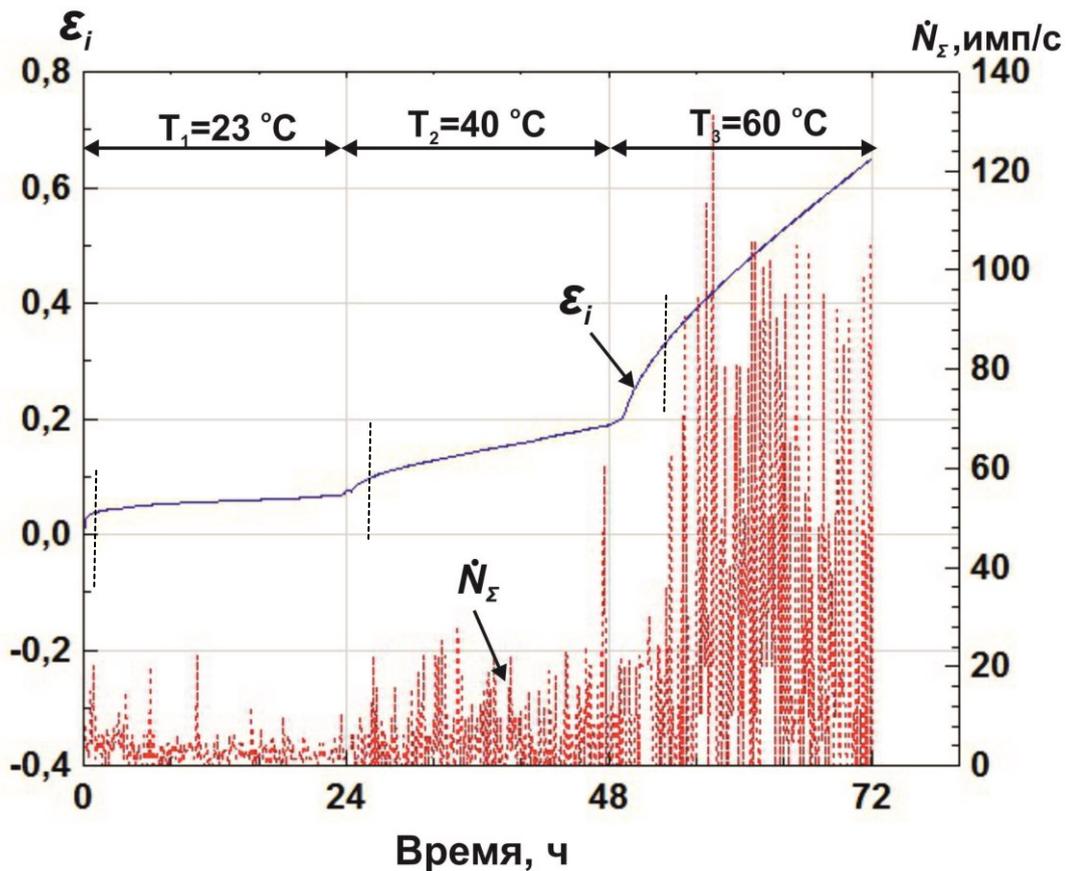


Рисунок 3.16 - Графики изменения интенсивности деформаций ε_i и активности АЭ \dot{N}_Σ в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры T и трёхосном напряжённом состоянии $\sigma_1=30$ МПа и $\sigma_3=5$ МПа

Анализ этих зависимостей показал, что, как и в экспериментах при одноосном напряжённом состоянии ($\sigma_1=\text{const}$ и $\sigma_3=0$), характер и значения деформаций ε_l и ε_i с ростом температуры достаточно сильно изменяются, что объясняется её влиянием на пластичность каменной соли. Также обращает на себя внимание, что на всех температурных ступенях степень изменений деформаций существенно больше, чем активности АЭ. В трехосном состоянии переход на каждую последующую ступень температурного воздействия сопровождается возрастанием крутизны зависимостей $\varepsilon_l=f(T, \sigma_d)$ и $\varepsilon_i=f(T, \sigma_d)$, где σ_d - девиатор напряжений ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$). Такая же тенденция

наблюдалась и в экспериментах при одноосном состоянии. В трехосном состоянии при переходе на каждую последующую температурную ступень сначала наблюдается ярко выраженный нелинейный характер изменения кривых, затем линейный. Угол наклона α , который получен путем проведения касательной к кривым $\varepsilon_I=f(T)$ и $\varepsilon_i=f(T)$ в точке, соответствующей центру линейного участка каждой ступени может являться количественной оценкой этих зависимостей. В связи с этим каждый температурный интервал разделен на два подинтервала (нелинейный и линейный). На рисунках 3.11-3.16 границы между подинтервалами показаны пунктирными линиями. Соответствующий угол наклона кривой определялся на линейном участке, то есть касательная проводилась в центральной точке данного участка. Значения углов α для различных величин σ_d и при различных температурах, а также средние значения активности АЭ $\dot{N}_{\Sigma cp}$ за указанный температурный интервал приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Углы, характеризующие крутизну зависимостей $\varepsilon_i=f(T, \sigma_d)$ и средняя активность АЭ $\dot{N}_{\Sigma cp}$ на различных температурных ступенях

Девиатор напряжений σ_d , МПа	Температура, °С	Угол α , град	Средняя активность $\dot{N}_{\Sigma cp}$, имп/с
15	$T_1=23$	3	1,03
	$T_2=40$	6	1,13
	$T_3=60$	16	1,22
	$T_4=80$	30	2,51
20	$T_1=23$	7	2,36
	$T_2=40$	9	2,40
	$T_3=60$	18	6,59
	$T_4=80$	33	12,0
25	$T_1=23$	6	3,16
	$T_2=40$	13	5,37
	$T_3=60$	39	23,8

Как видно из рисунков 3.12, 3.14 и 3.16 и данных таблицы 3.2, в каждой группе образцов, где была постоянная разница напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$ наблюдается увеличение угла наклона линейного участка зависимостей $\varepsilon_i = f(T, \sigma_d)$. Причем чем больше девиатор напряжений σ_d , тем больше угол наклона на каждой температурной ступени. Максимальный угол наклона $\alpha = 39$ град имеет место при $\sigma_d = 25$ МПа и $T = 60$ °С. Однако и при этих параметрах перехода к прогрессирующей ползучести не наблюдается. Это обусловлено препятствующим процессу ползучести влиянием бокового давления. Напомним, что в одноосном состоянии переход в прогрессирующую ползучесть наблюдался при углах $\alpha = 55-60$ градусов. В то же время, при трёхосном нагружении каменной соли значительное возрастание угла α в сочетании с заметным ростом величины $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$ видимо может служить прогнозным признаком скорого перехода к прогрессирующей ползучести. Скорее всего снижение боковой нагрузки образца, находящегося в сложном напряжённом состоянии, могло бы привести к скачкообразному переходу к образцу в стадию прогрессирующей ползучести. Сравнивая значения активности акустической эмиссии в различных группах образцов, можно отметить, что максимальное значение \dot{N}_{Σ} отмечается в группе, для которой имеет наибольшее значение девиатор напряжений σ_d . Также отметим, что в пределах одной группы образцов, для которой $\sigma_d = \text{const}$, по мере перехода к каждому последующему температурному интервалу наблюдается заметное увеличение средней активности АЭ.

Выводы к главе 3:

1. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о существенном влиянии температуры на механические свойства каменной соли в условиях одноосного и трёхосного сжатия. Так изменение температуры на 20-40 °С при неизменном напряжении в 5-10 раз увеличивает деформирование каменной соли и может приводить к её разрушению.

2. В условиях одноосного сжатия переход каменной соли от стадии установившейся к стадии прогрессирующей ползучести, сопровождается скачком примерно вдвое и последующим резким возрастанием активности АЭ, что позволяет точно установить момент перехода через границу между указанными стадиями на основе относительно просто реализуемых пороговых измерений.

3. В условиях длительного трехосного сжатия каменная соль не переходит в стадию прогрессирующей ползучести, однако на высоких температурах значительно возрастают скорость её деформирования и значения активности АЭ. Такое возрастание может рассматриваться как прогнозный признак приближающегося перехода к прогрессирующей ползучести, который может произойти даже при незначительном снижении бокового давления.

4. Метод акустической эмиссии обеспечивает возможность решения прогнозных задач, связанных с оценкой влияния температур на процессы деформирования и разрушения каменной соли, при этом он может использоваться как самостоятельно, так и в качестве важного дополнения к традиционным деформационным измерениям.

Глава 4. Особенности проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти образцов каменной соли в условиях изменяющихся температурных воздействий

4.1 Влияние температурных воздействий на проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти образцов каменной соли при их циклическом одноосном нагружении с возрастающим от цикла к циклу максимальным уровнем напряжения

Особенности проявления акустико-эмиссионного (АЭ) эффекта памяти (ЭП) каменной соли при её одноосном циклическом нагружении с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением и изменяющихся температурных воздействиях исследовались на выборке из 27 образцов, подробное описание результатов приведено в работе [117]. Образцы имели цилиндрическую форму высотой 80 мм и диаметром 40 мм. Они были получены с глубины 1000 м Калининградского месторождения, имели равномерно-зернистую кристаллическую структуру и прошли предварительное цензурирование. Подробное литологическое описание и усредненные физико-механические характеристики исследованных образцов приведены в главе 2.

Экспериментальные исследования проводились с использованием аппаратного комплекса, блок- схема которого представлена на рисунке 4.1.

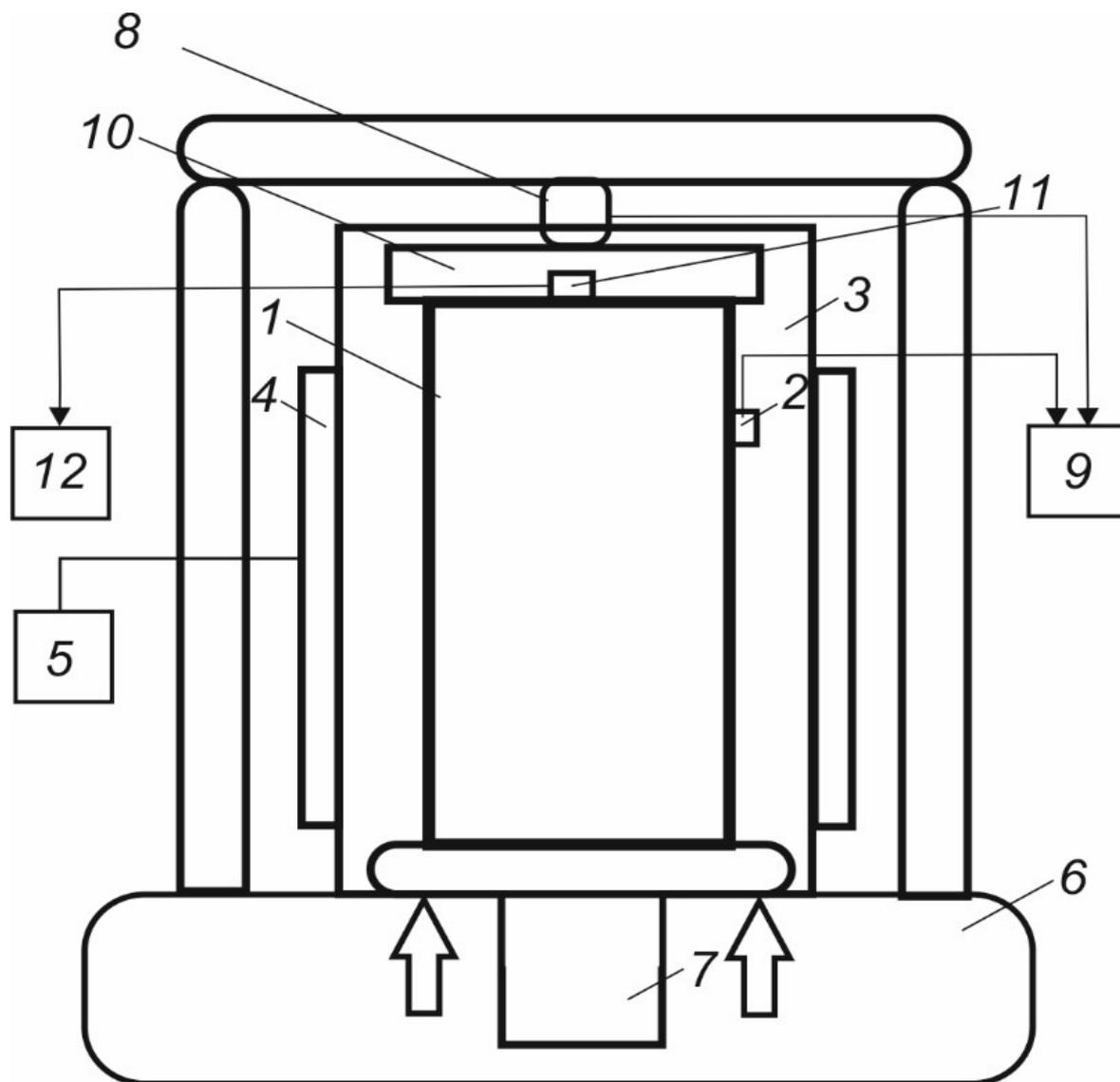


Рисунок 4.1 - Блок - схема аппаратного комплекса для исследования акустико-эмиссионного эффекта памяти в образцах каменной соли при различных температурах

Образец 1 с закреплённым на нём датчиком температуры 2 помещался в цилиндрическую камеру 3. Нагрев этой камеры до заданной температуры осуществлялся размещённым по её периметру электронагревательным элементом 4, подключённым к программируемому терморегулятору 5. С помощью гидравлического механизма 6 осуществлялось перемещение поршня 7, создающего в образце возрастающее, а затем спадающее с

постоянной скоростью $\dot{\sigma}_1=0,05$ МПа/с одноосное напряжённое состояние. При этом значение напряжения в образце, контролируемое датчиком силы 8, а также сигналы температурного датчика 2 непрерывно регистрировались на компьютере 9. Сигналы акустической эмиссии, возникающие при нагружении образца, принимались размещенным в защитном корпусе 10 пьезоэлектрическим преобразователем 11 и подавались на акустико-эмиссионную измерительную систему 12 A-line 32D, где вычислялась и регистрировалась их активность. Таким образом, аппаратный комплекс позволял получать графики синхронного изменения во времени активности АЭ \dot{N}_Σ и циклически изменяющегося одноосного напряжения σ_1 для каждого конкретного значения температуры T_i , на которой проводился эксперимент.

Всего было проведено 27 экспериментов (по числу исследованных образцов, которые были разделены на 3 равные группы). Таким образом, осуществлялось многократное дублирование соответствующего эксперимента, результаты которого принимались за истинные при условии, что для образцов одной группы качественно они совпадали. Поскольку такое совпадение действительно имело место, то ниже будут приведены экспериментальные данные, полученные только на одном из образцов каждой группы.

В каждой группе образцов проводился эксперимент, который включал 3 этапа исследования одного и того же образца каменной соли. Эти этапы отличались режимами проведения испытаний: температурой T_i , значениями максимальных σ_{\max} и минимальных σ_{\min} напряжений в цикле. Указанные режимы отражены в таблице 4.1.

Таблица 4.1- Режимы экспериментов

Номер эксперимента	Номер этапа	T, °C	Номер цикла нагрузки - разгрузки-	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа
1	1	23	I	3	2
			II	6	2
			III	9	2
	2	40	I	12	3
			II	15	3
			III	18	3
	3	23	I	3	2,2
			II	6	2,2
			III	9	2,8
2	1	23	I	3	1,3
			II	6	1
			III	9	1,5
	2	60	I	12	3,5
			II	15	3,5
			III	18	3,6
	3	23	I	3	1,6
			II	6	2
			III	9	2,2
3	1	23	I	3	2,5
			II	6	2,5
			III	9	1,8
	2	80	I	12	3,8
			II	15	3,6
			III	18	3
	3	23	I	3	1,5
			II	6	0,5
			III	8,9	0,5

В первой группе образцов проводился следующий эксперимент. На первом этапе при температуре $T=23^{\circ}\text{C}$ образцы каменной соли подвергались трём циклам одноосного нагружения – разгрузки с максимальными значениями напряжений $\sigma_{\max(I)} = 3$ МПа, $\sigma_{\max(II)} = 6$ МПа и $\sigma_{\max(III)} = 9$ МПа в каждом цикле соответственно. При этом, минимальные значения напряжений в каждом из трёх циклов были равны и составляли $\sigma_{\min} = 2$ МПа. Затем, после примерно 30 минут выдержки начинался второй этап эксперимента уже при температуре 40°C . На этом этапе образцы подвергались трём циклам

одноосного нагружения – разгрузки с максимальными значениями напряжений $\sigma_{\max(I)} = 12$ МПа, $\sigma_{\max(II)} = 15$ МПа и $\sigma_{\max(III)} = 18$ МПа в каждом цикле соответственно. При этом минимальные значения напряжений в каждом из трёх циклов были равны и составляли $\sigma_{\min} = 3$ МПа. После остывания образцов до комнатной температуры осуществлялся переход к третьему этапу, на котором при температуре $T = 23^\circ\text{C}$ образцы подвергались трём циклам одноосного нагружения – разгрузки с максимальными значениями напряжений $\sigma_{\max(I)} = 3$ МПа, $\sigma_{\max(II)} = 6$ МПа и $\sigma_{\max(III)} = 9$ МПа в каждом цикле соответственно. При этом, минимальные значения напряжений в каждом из трёх циклов составляли $\sigma_{\min(I)} = \sigma_{\min(II)} = 2,2$ МПа, $\sigma_{\min(III)} = 2,8$ МПа соответственно.

Во второй и третьей группах образцов, проводимый эксперимент был аналогичен эксперименту, который проводился в первой группе и отличался по сути лишь максимальной температурой второго этапа, которая составляла 60°C и 80°C соответственно.

Зависимости активности АЭ из каждой группы образцов каменной соли в функции от циклически изменяющегося одноосного напряжения и различных значений температур $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1, T_i)$ представлены на рисунках 4.2-4.10 соответственно.

Как следует из результатов эксперимента проводимого в первой группе образцов (рисунок 4.2), цикл I одноосного механического нагружения образца сопровождается значимым ростом активности АЭ \dot{N}_Σ при уровне напряжения $\sigma_1 \approx 1,5 \text{ МПа} \approx 0,062 \sigma_c$, с которого, очевидно, начинается интенсивное дефектообразование в каменной соли. Увеличение \dot{N}_Σ до максимального значения $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$ заканчивается с началом снижения величины σ_1 . В этот момент значение \dot{N}_Σ резко падает практически до нуля, возобновляя свой рост только при достижении возрастающим напряжением цикла II значения $\sigma_{1\max} = 3$ МПа цикла I. Аналогичные закономерности изменения \dot{N}_Σ имеют место и в цикле III, где увеличение от $\dot{N}_\Sigma \approx 0$ до $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$ происходит скачком в момент, когда σ_1 цикла II достигает значения $\sigma_{1\max} = 6$

МПа цикла I. Отметим также, что в циклах I и II на стадиях разгрузки наблюдается всплеск значений \dot{N}_Σ , которые, однако, существенно меньше, чем $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$. Таким образом, при комнатной температуре $T=23^\circ\text{C}$ в образцах каменной соли наблюдается классический АЭ ЭП.

Как видно из рисунка 4.3, переход ко второму этапу эксперимента, то есть к температуре $T=40^\circ\text{C}$, не «стирает» память о значении $\sigma_{1\max}=9$ МПа цикла III первого этапа. На остальных двух циклах нагружения второго этапа АЭ ЭП проявляется, как и на первом этапе, достаточно чётко. Скачок \dot{N}_Σ в цикле II имеет место при $\sigma_{1\max}$ цикла I, а скачок \dot{N}_Σ в цикле III при $\sigma_{1\max}$ цикла II. В то же время, наблюдаемый на стадиях разгрузки всех трёх циклов всплеск \dot{N}_Σ при $T=40^\circ\text{C}$ имеет существенно большие относительно $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$ значения, чем при $T=23^\circ\text{C}$.

При переходе к третьему этапу эксперимента, то есть при снижении температуры от $T=40^\circ\text{C}$ до $T=23^\circ\text{C}$, информация о $\sigma_{1\max}$ цикла III второго этапа не сохраняется. Из рисунка 4.4 видно, что значительный рост \dot{N}_Σ в цикле I наблюдается сразу с ростом σ_1 , то есть гораздо раньше $\sigma_{1\max}$ цикла III второго этапа. Далее в циклах II и III третьего этапа АЭ ЭП проявляется достаточно чётко, а наблюдаемые на стадиях разгрузки этих циклов всплески \dot{N}_Σ относительно $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$ по сравнению со вторым этапом существенно уменьшаются.

Как следует из рисунков 4.5-4.10, основные закономерности АЭ ЭП, установленные в эксперименте проводимом в первой группе образцов справедливы и для экспериментов, проведенных во второй и третьей группе образцов каменной соли, несмотря на то, что на втором этапе в этих группах температура образцов составляла уже не 40°C , а 60°C и 80°C соответственно.

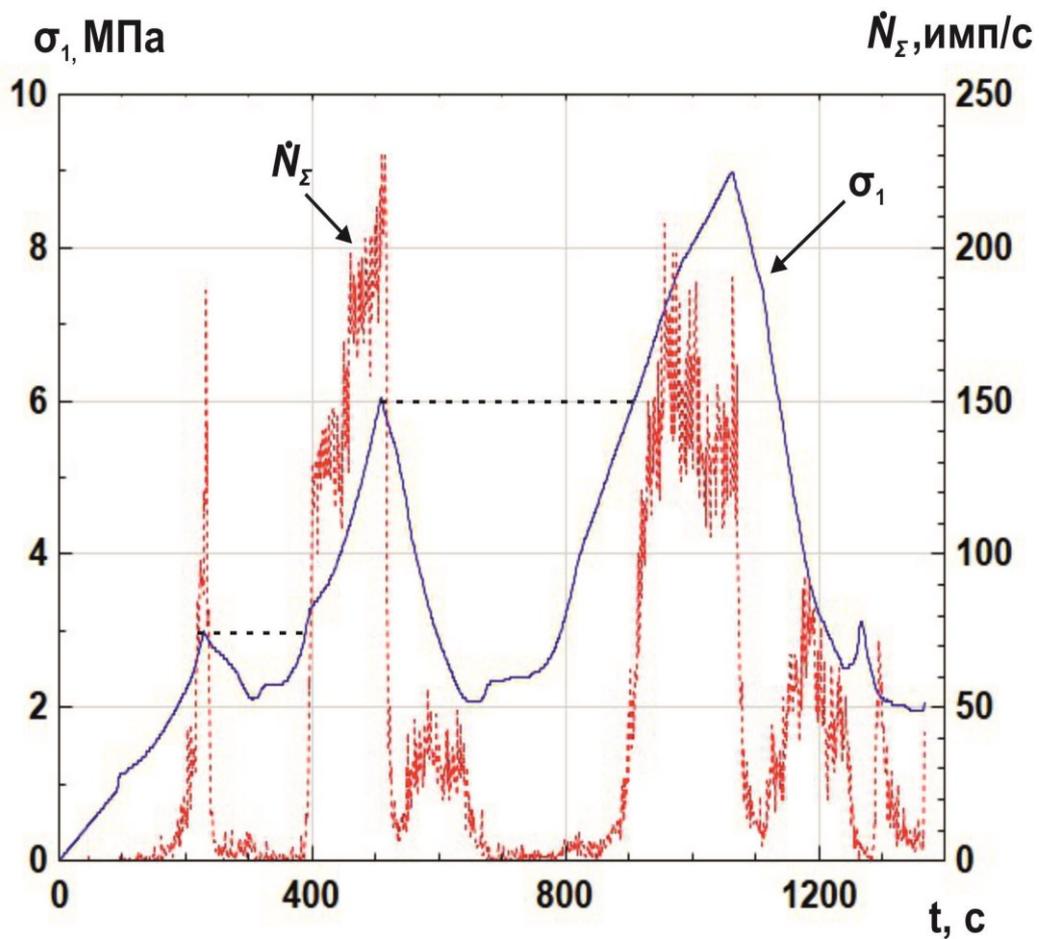


Рисунок 4.2 - Зависимости $\dot{N}_z = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением, полученные при проведении эксперимента в первой группе образцов на первом этапе исследования при температуре $T_1=23^\circ\text{C}$

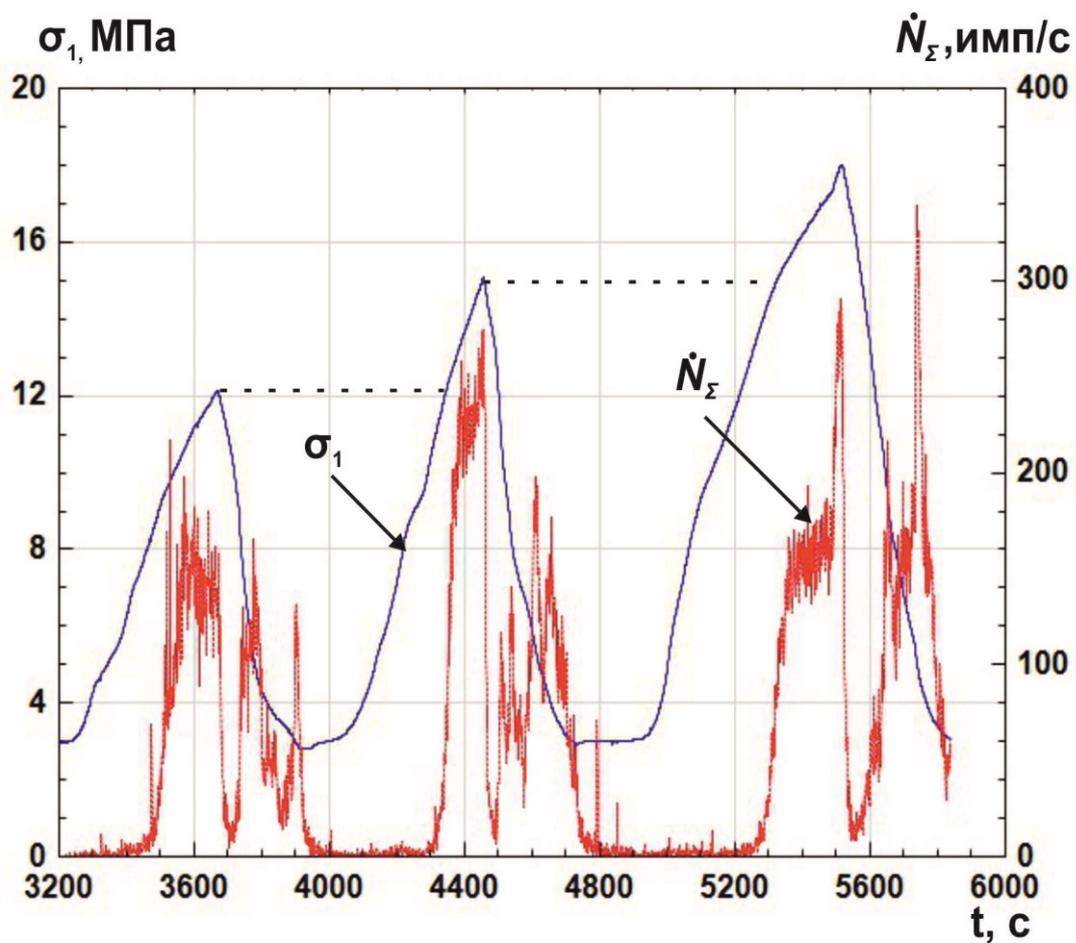


Рисунок 4.3 - Зависимости $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением, полученные при проведении эксперимента в первой группе образцов на втором этапе исследования при температуре $T_2=40^\circ\text{C}$

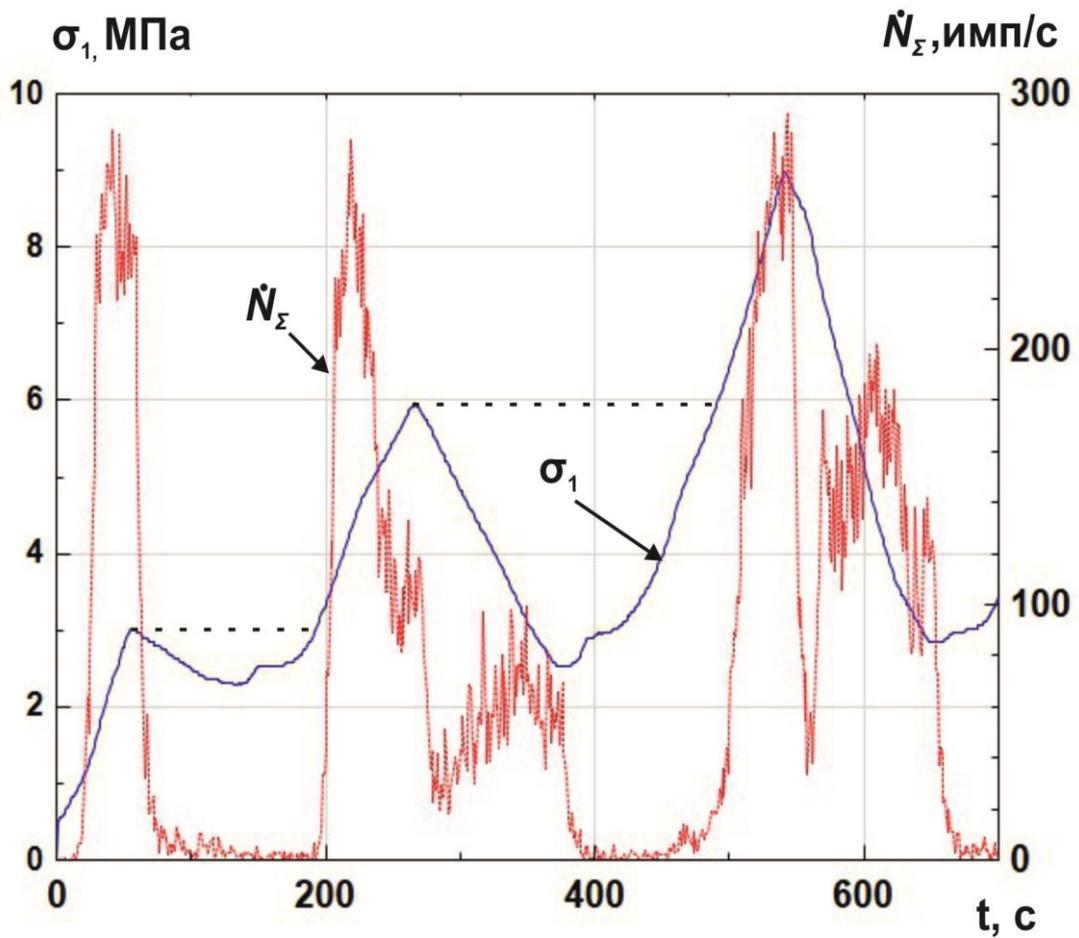


Рисунок 4.4 - Зависимости $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением, полученные при проведении эксперимента в первой группе образцов на третьем этапе исследования при температуре $T_3=23\text{ }^\circ\text{C}$

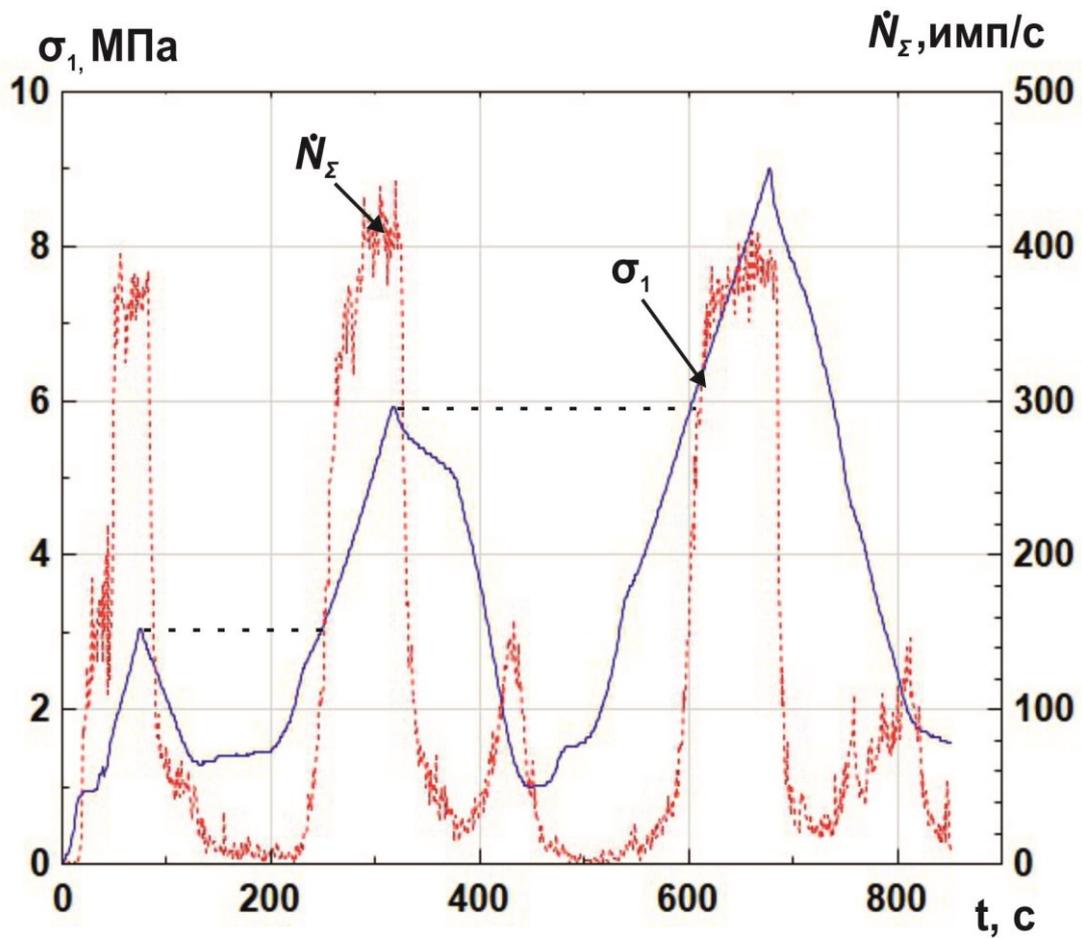


Рисунок 4.5 – Зависимости $\dot{N}_z = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением, полученные при проведении эксперимента во второй группе образцов на первом этапе исследования при температуре $T_1=23\text{ }^\circ\text{C}$

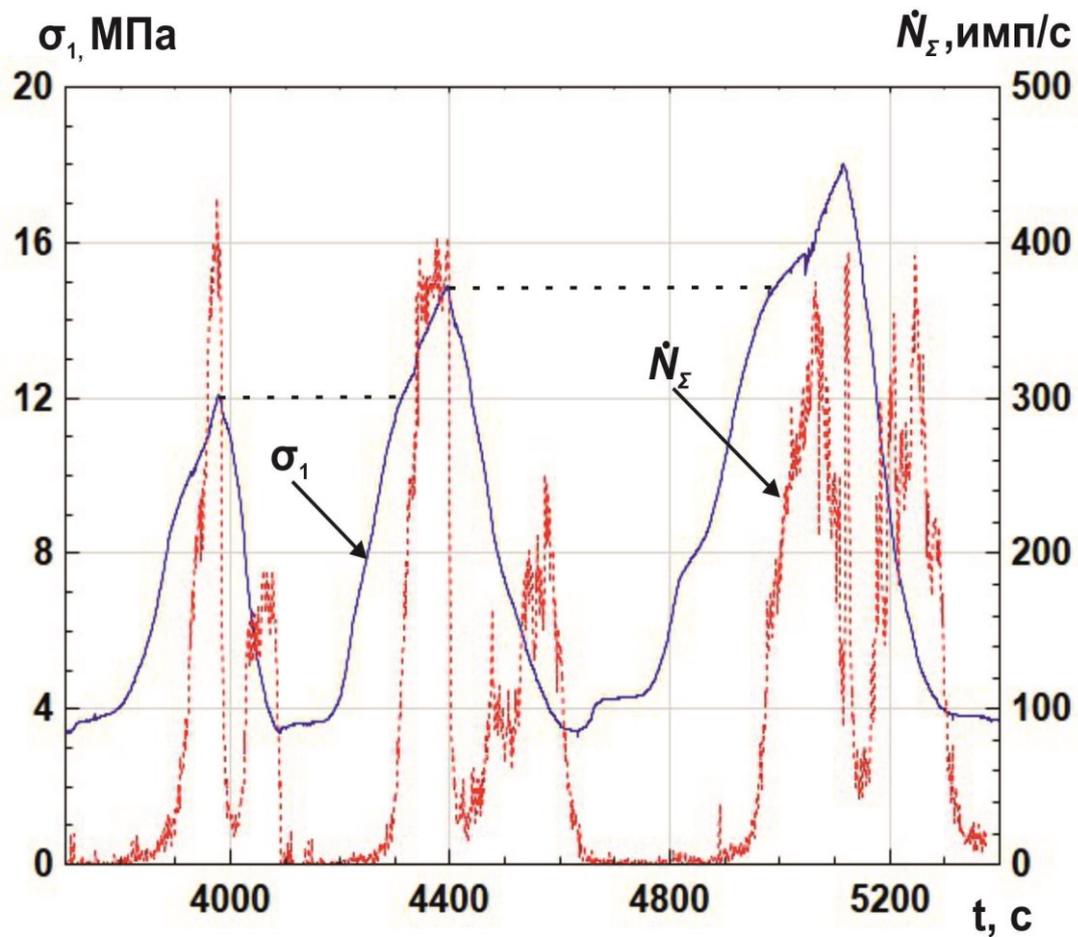


Рисунок 4.6 - Зависимости $\dot{N}_z = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением, полученные при проведении эксперимента во второй группе образцов на втором этапе исследования при температуре $T_2=60^\circ\text{C}$

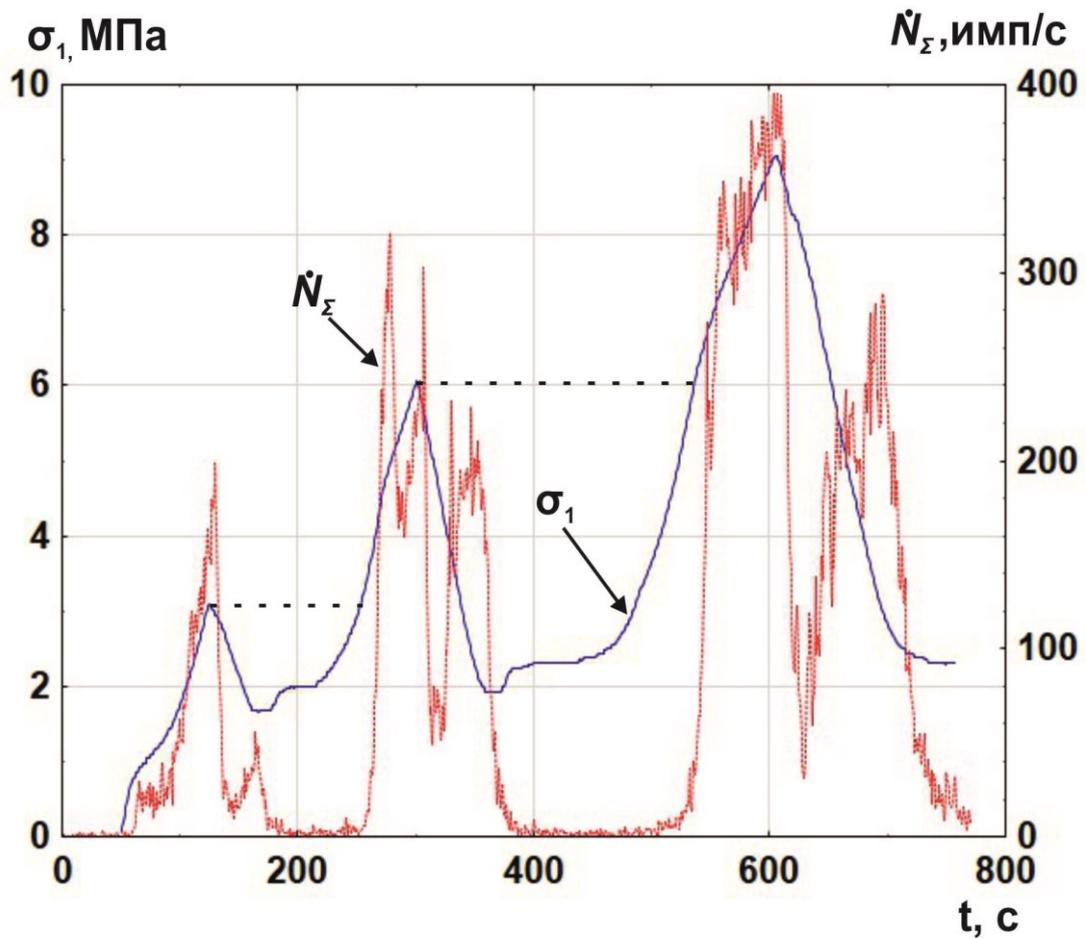


Рисунок 4.7 - Зависимости $\dot{N}_z = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением, полученные при проведении эксперимента во второй группе образцов на третьем этапе исследования при температуре $T_3=23\text{ }^\circ\text{C}$

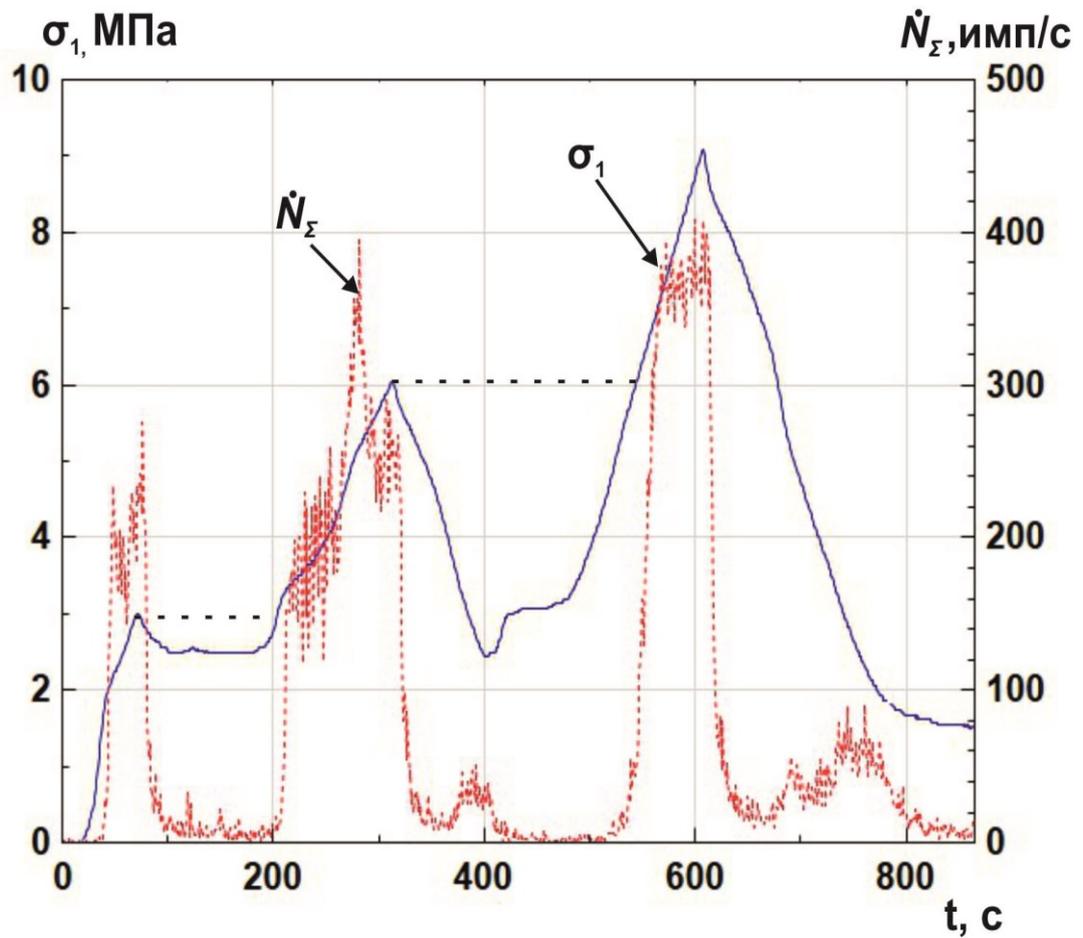


Рисунок 4.8 - Зависимости $\dot{N}_z = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением, полученные при проведении эксперимента в третьей группе образцов на первом этапе исследования при температуре $T_1=23^\circ\text{C}$

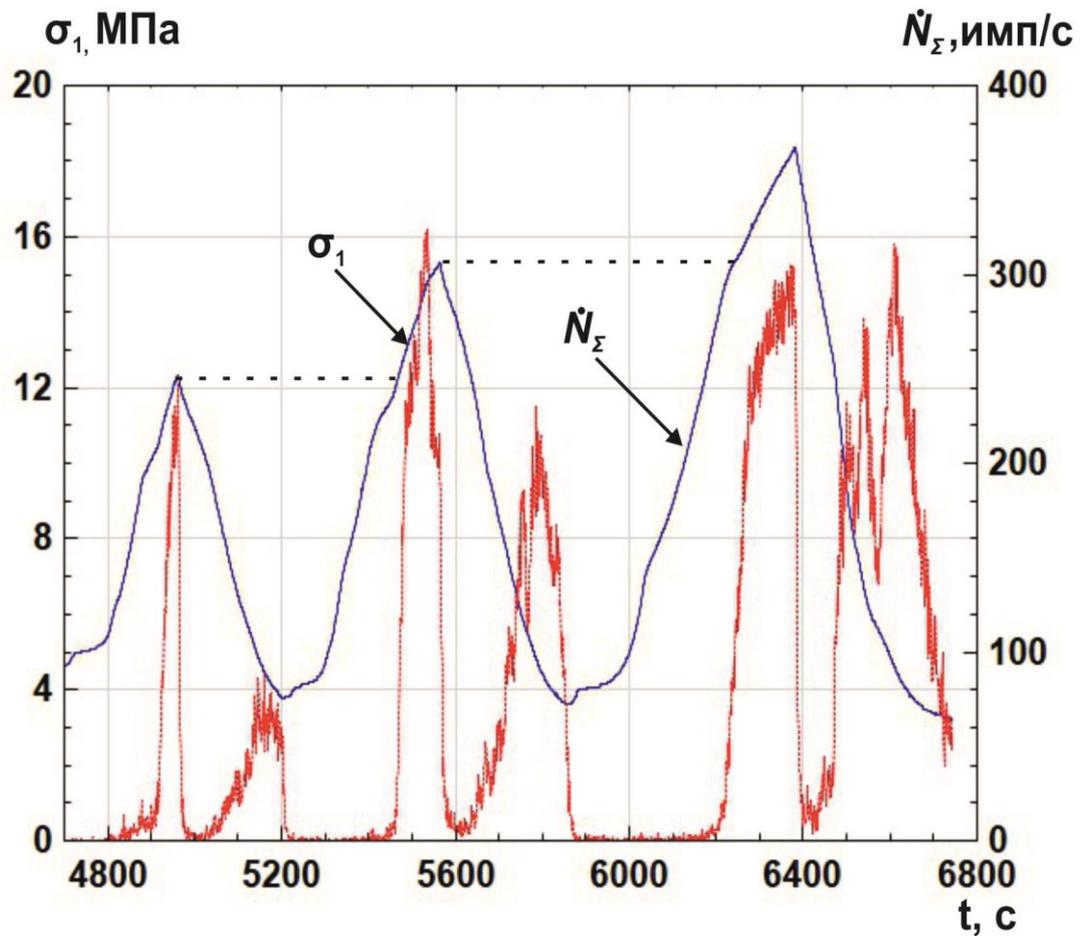


Рисунок 4.9 - Зависимости $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением, полученные при проведении эксперимента в третьей группе образцов на втором этапе исследования при температуре $T_2=80^\circ\text{C}$

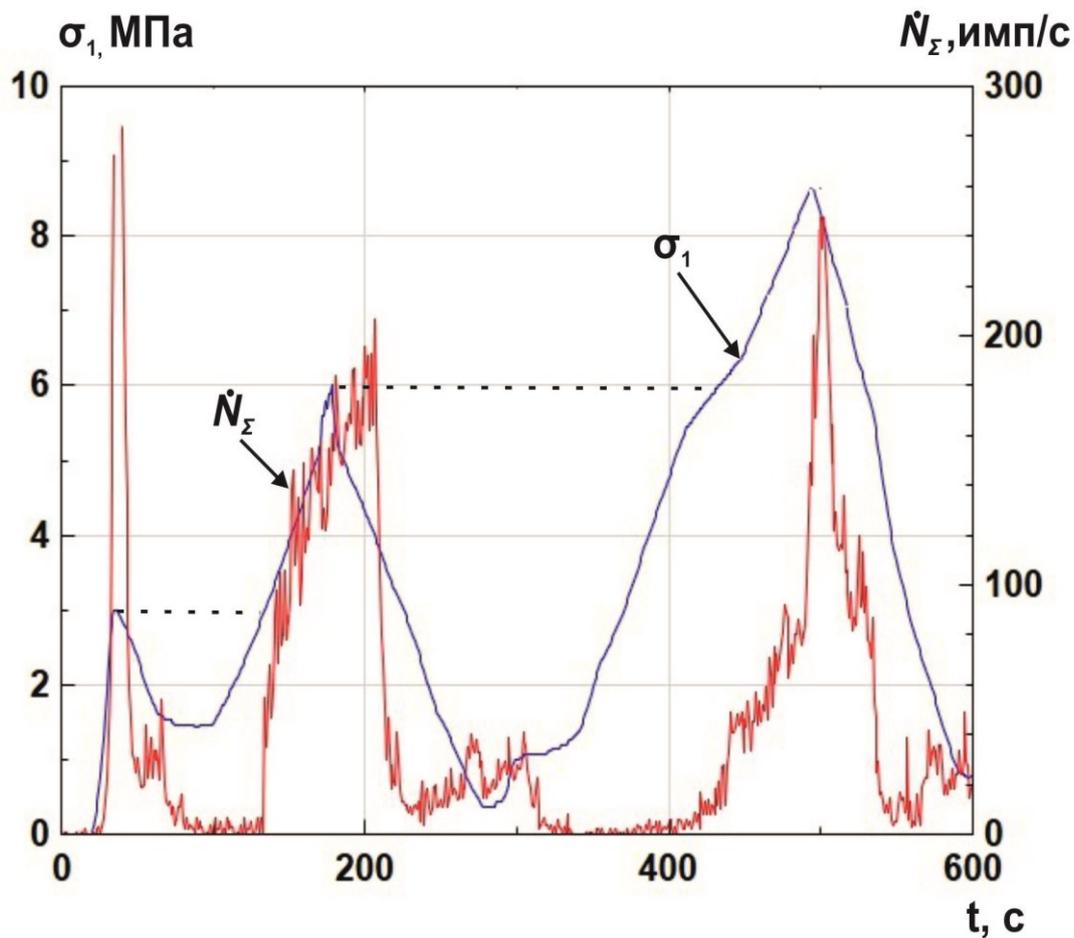


Рисунок 4.10 - Зависимости $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением, полученные при проведении эксперимента в третьей группе образцов на третьем этапе исследования при температуре $T_3=23\text{ }^\circ\text{C}$

4.2 Проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти каменной соли при её одноосном циклическом нагружении с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле в условиях изменяющегося температурного воздействия

С целью изучения особенностей проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти образцов каменной соли в условиях одноосного циклического нагружения с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле и изменяющемся температурном воздействии, исследовалась выборка из 18 образцов, аналогичных описанным в параграфе 4.1. В этом же параграфе дано описание аппаратного комплекса, с использованием которого проводились исследования, подробное описание результатов исследований приведено в работе [117]

Всего было проведено 18 экспериментов на 2-х равных группах образцов. Как и в описанных в предыдущем параграфе экспериментах, это обеспечивало необходимое для гарантированной достоверности получаемых результатов дублирование. Поскольку указанные результаты качественно совпадали у всех образцов соответствующей группы, то ниже они будут представлены экспериментальными данными, полученными только на одном из входящих в группу образцов.

В каждой группе образцов проводился эксперимент, который включал 3 этапа исследования одного и того же образца каменной соли. Эти этапы отличались режимами проведения испытаний: температурой T_i , значениями минимальных σ_{\min} напряжений в цикле, значения же максимальных σ_{\max} были одинаковы в каждом цикле. Указанные режимы отражены в таблице 4.2.

Таблица 4.2- Режимы экспериментов

Номер эксперимента	Номер этапа	T, °C	Номер цикла разгрузки-нагрузки	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа
1	1	23	I	12	1,5
			II	12	0,8
			III	12	1
	2	40	I	12	2
			II	12	1,8
			III	12	1,5
	3	23	I	12	2
			II	12	2,5
			III	12	2,5
2	1	23	I	12	1,5
			II	12	2
			III	12	2
	2	60	I	12	2,9
			II	12	2,9
			III	12	2,9
	3	23	I	12	2,1
			II	12	2,1
			III	12	2,1

Зависимости активности АЭ каждого из двух характерных образцов каменной соли из различных групп в функции от циклически повторяющегося одноосного напряжения и различных значений температур $\dot{N}_{\Sigma}=f(\sigma_1, T_i)$ представлены на рисунках 4.11-4.16 соответственно.

Особенностью эксперимента, который был проведен в первой группе образцов, является постоянство максимального уровня напряжений на всех его этапах и во всех циклах $\sigma_{1\max}=12$ МПа. Однако, и при таком режиме нагружения АЭ ЭП, хотя и менее чётко, но всё же проявляется. Так из рисунка 4.11 следует, что при $T=23$ °C устойчивый рост активности АЭ \dot{N}_{Σ} в циклах II и III начинается не при $\sigma_{1\max}=12$ МПа, а существенно раньше при $\sigma_1 \approx 9$ МПа, то есть коэффициент сохранности памяти (отношение напряжения, при котором начинается рост \dot{N}_{Σ} в цикле n к $\sigma_{1\max}$ цикла n-1) $FR \approx 0,75$. Это связано с тем, что дефектообразование связано, прежде всего, с деформациями образца, а на стадии пластического деформирования рост

деформаций каменной соли может значительно опережать рост напряжений [72].

На всех трёх этапах эксперимента, проводимого в первой группе образцов циклическое нагружение осуществлялось до одинаковых максимальных напряжений в каждом из трёх циклов $\sigma_{\max(I)} = \sigma_{\max(II)} = \sigma_{\max(III)} = 12$ МПа. При этом на первом этапе поддерживалась температура $T=23^\circ\text{C}$. Затем, при переходе ко второму этапу температура поднималась до $T=40^\circ\text{C}$, а на третьем этапе она снова опускалась до $T=23^\circ\text{C}$.

Во второй группе образцов, проводимый эксперимент был аналогичен эксперименту, который проводился в первой группе и отличался по сути лишь максимальной температурой второго этапа, которая составляла 60°C .

Подробное описание результатов приведено в работе [117].

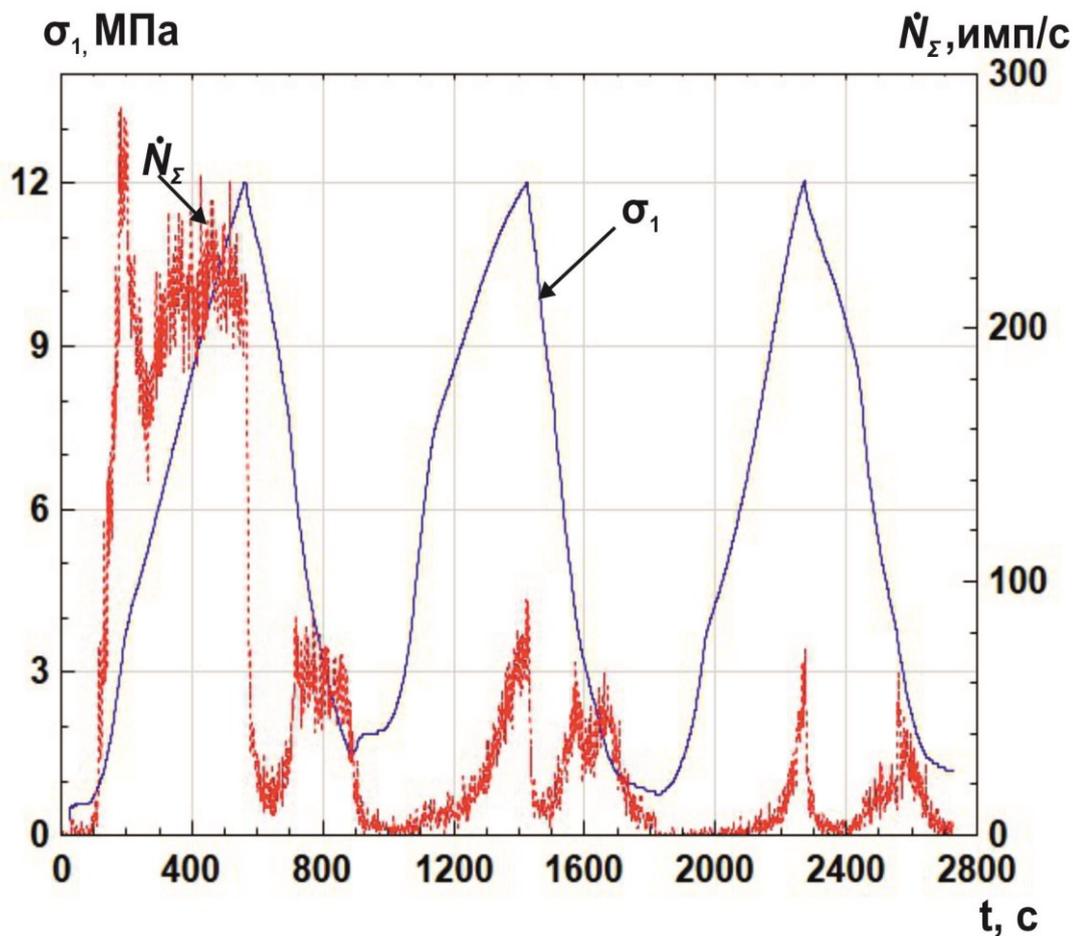


Рисунок 4.11 - Зависимости $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле, полученные при проведении эксперимента в первой группе образцов на первом этапе исследования при температуре $T_1=23^\circ\text{C}$

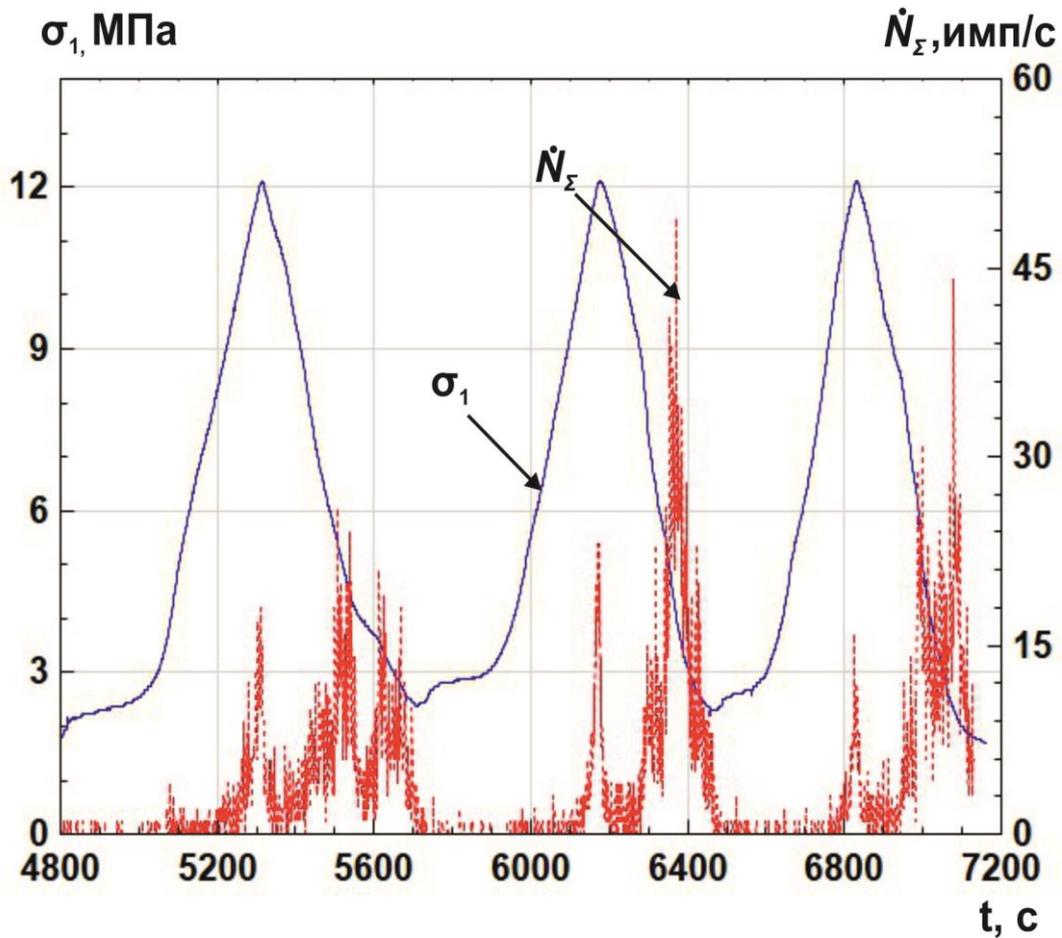


Рисунок 4.12 - Зависимости $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле, полученные при проведении эксперимента в первой группе образцов на втором этапе исследования при температуре $T_2=40^\circ\text{C}$

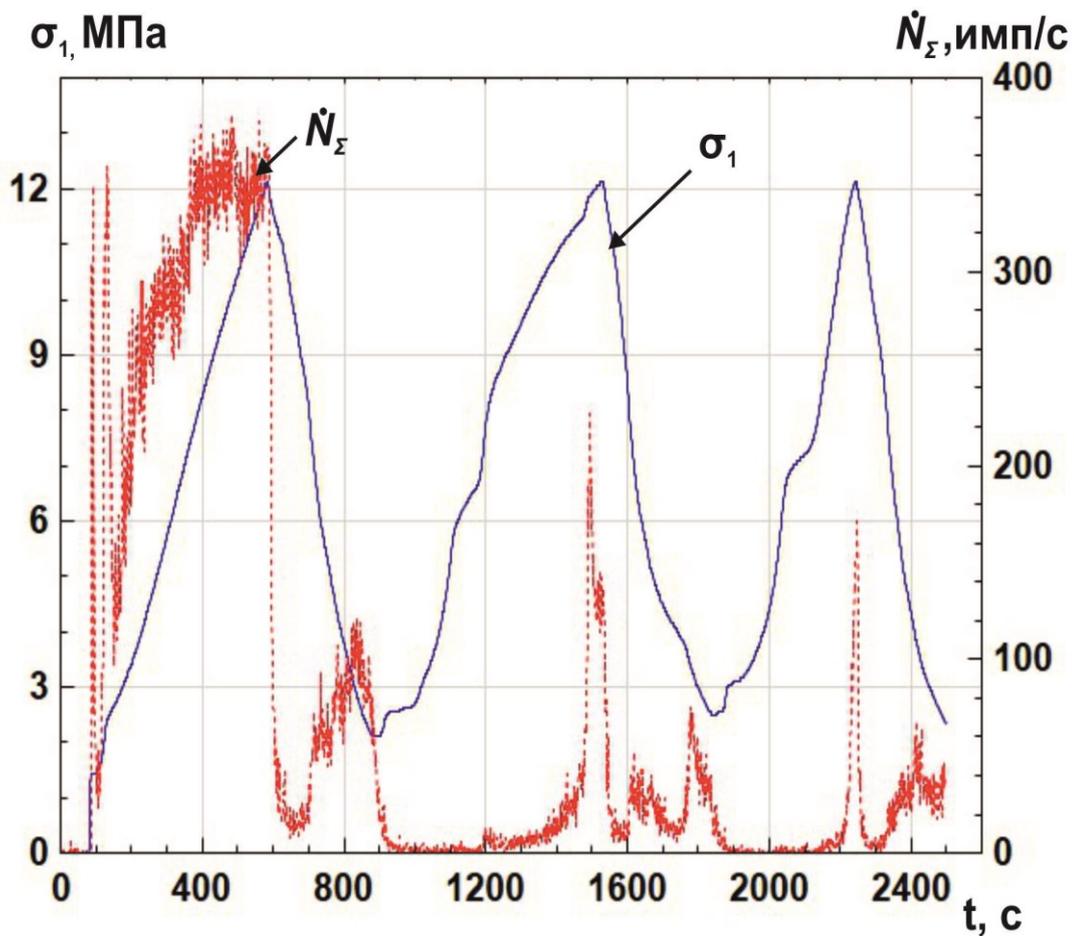


Рисунок 4.13 - Зависимости $\dot{N}_z = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле, полученные при проведении эксперимента в первой группе образцов на третьем этапе исследования при температуре $T_3=23^\circ\text{C}$

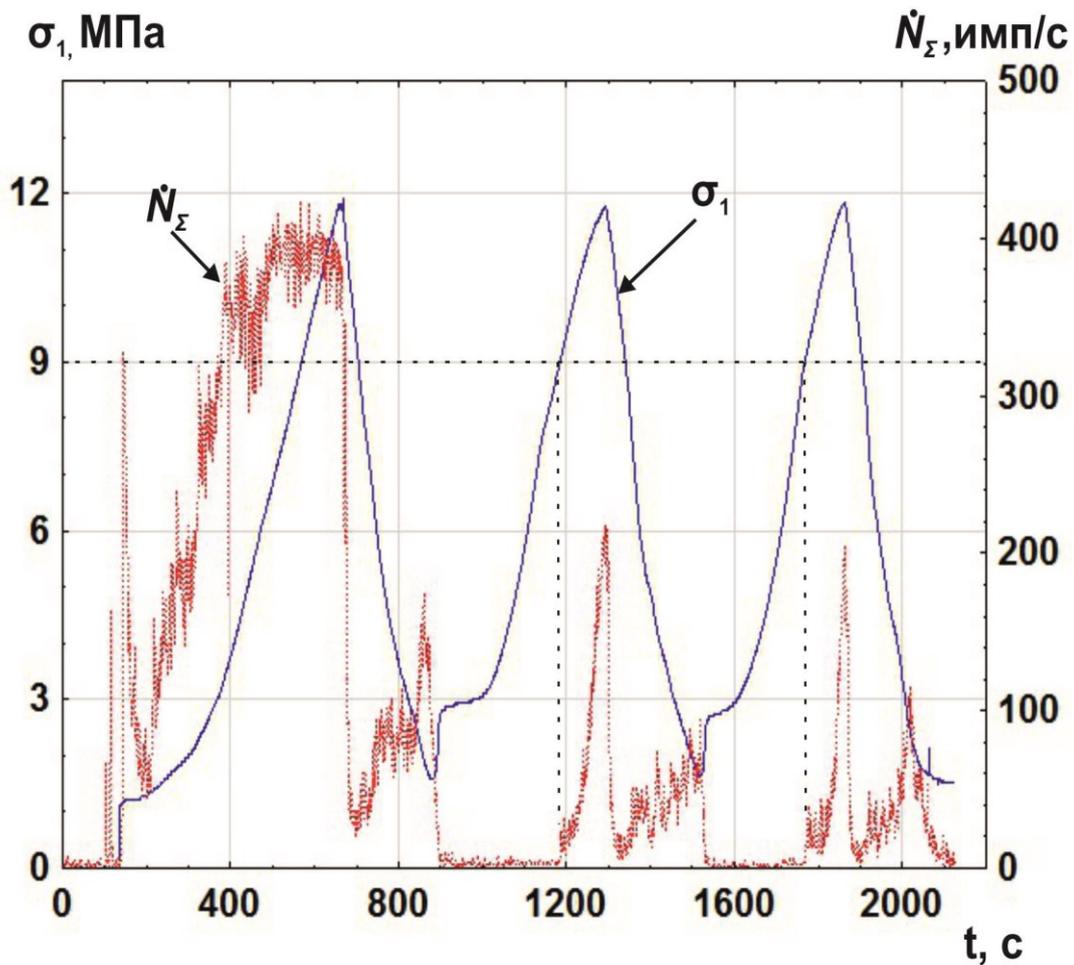


Рисунок 4.14 - Зависимости $\dot{N}_z = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле, полученные при проведении эксперимента во второй группе образцов на первом этапе исследования при температуре $T_1=23\text{ }^\circ\text{C}$

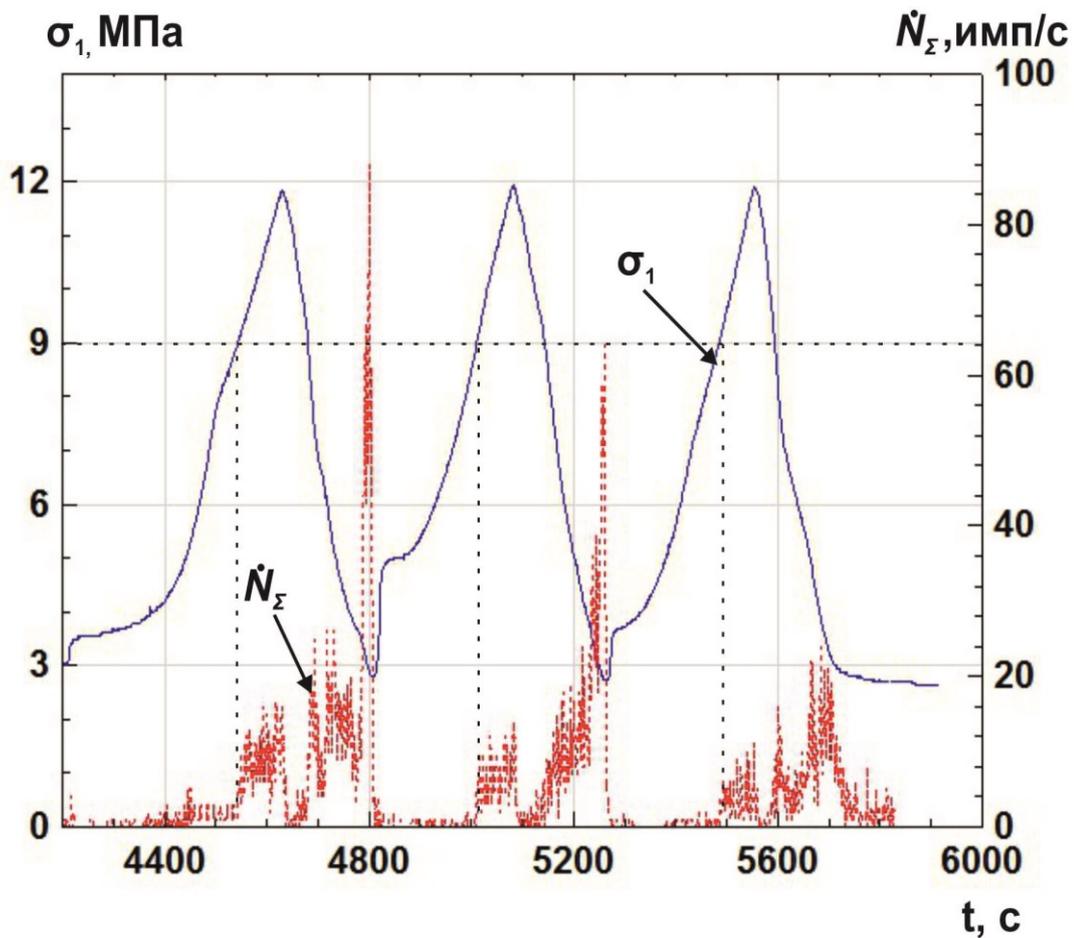


Рисунок 4.15 - Зависимости $\dot{N}_z = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле, полученные при проведении эксперимента во второй группе образцов на втором этапе исследования при температуре $T_2=60^\circ\text{C}$

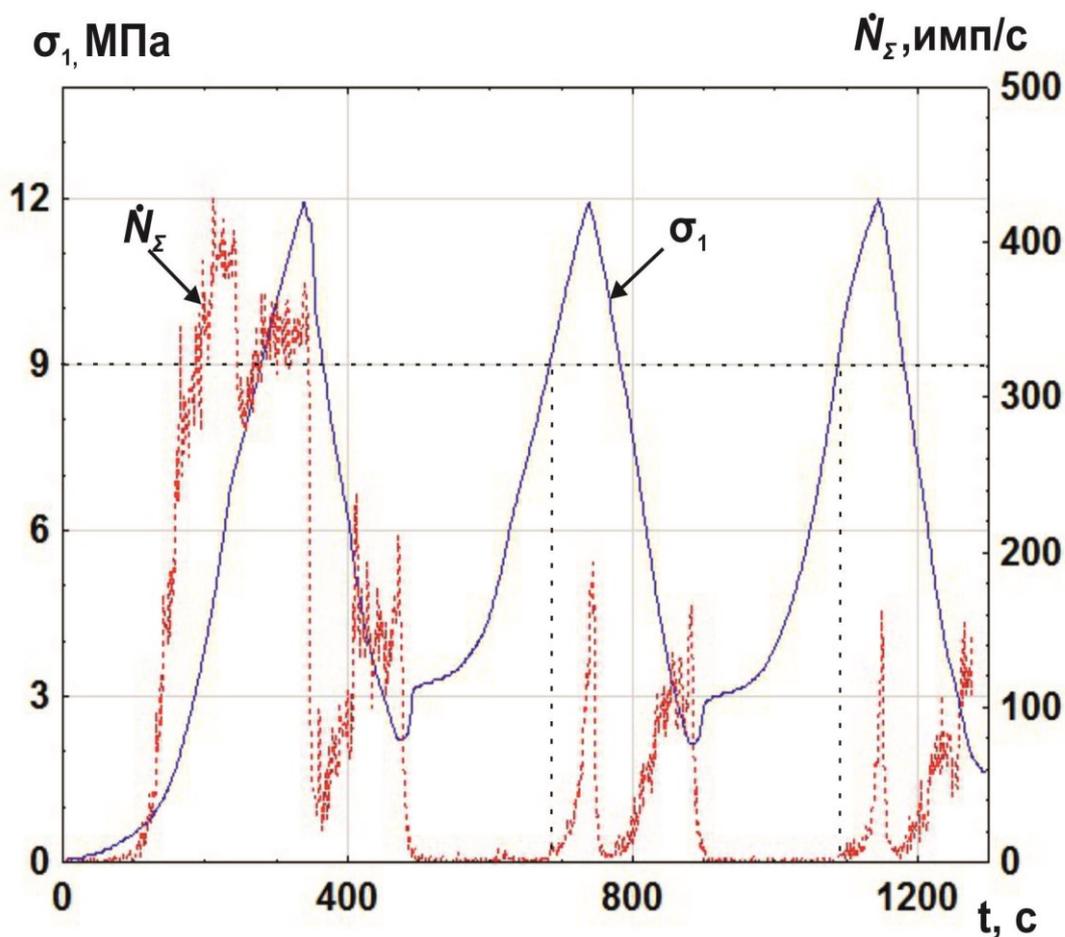


Рисунок 4.16 - Зависимости $\dot{N}_{\Sigma} = f(\sigma_1)$ при циклическом нагружении образца каменной соли с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле, полученные при проведении эксперимента во второй группе образцов на третьем этапе исследования при температуре $T_3=23\text{ }^{\circ}\text{C}$

Как видно из рисунка 4.12 при переходе ко второму этапу эксперимента, то есть к температуре $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$, АЭ ЭП проявляется при $\sigma_1 \approx 9$ МПа во всех трёх циклах причём значения $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$ в них существенно ниже, чем при $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обращает также на себя внимание, запаздывание перехода

от возрастающих к уменьшающимся значениям \dot{N}_Σ относительно момента такого перехода напряжениями.

При переходе к третьему этапу на $T=23^\circ\text{C}$ (рисунок 4.13) рост \dot{N}_Σ в цикле I начинается при $\sigma_1 < 1$ МПа, то есть память о $\sigma_{1\text{max}}=12$ МПа последнего цикла предыдущего этапа не сохраняется. В циклах II и III АЭ ЭП проявляется, как и на первом этапе при $\sigma_1 \approx 9$ МПа, хотя и при меньших значениях \dot{N}_Σ .

Основные закономерности АЭ ЭП, установленные в эксперименте проводимом во второй группе образцов приведены на рисунках 4.14-4.16. По данным этих рисунков стоит отметить, что проявление АЭ ЭП такое же, как и в экспериментах, проводимых в первой группе образцов, несмотря на то, что на втором этапе температура образцов составляла 60°C .

Выводы к главе 4:

1. Как показывают проведённые исследования, АЭ эффект памяти устойчиво проявляется, как при низких (порядка 23°C), так и при высоких (вплоть до 80°C) температурах. Память сохраняется также при переходе от низких к высоким температурам, то есть, первый цикл механического нагружения при высокой температуре «помнит» значение максимального напряжения предшествующего цикла, нагружение которого осуществлялось при низкой температуре. Однако обратный переход, когда предшествующий цикл нагружения осуществлялся при высокой температуре, а последующий при низкой полностью стирает акустико-эмиссионную память.

2. Акустико-эмиссионный эффект памяти, правда при меньшем значении показателя сохранности памяти FR, проявляется и в том случае, когда максимальные уровни напряжений в последующих циклах нагружения одинаковы. При этом АЭ ЭП сохраняется только при постоянстве температур в циклах или повышении температуры при переходе к последующему циклу. Если же температура при переходе к последующему циклу понижается то память о максимальном напряжении предыдущего цикла не сохраняется.

3. Исследования закономерностей акустико-эмиссионного эффекта памяти в образцах каменной соли по возможности должны проводиться с учётом реальных термобарических условий, имеющих место в массиве соляных горных пород. Важнейшей составляющей таких условий являются изменяющиеся в широких пределах температурные воздействия. Учёт таких воздействий при проведении лабораторных экспериментов позволит использовать их результаты для оценки напряжённо-деформированного состояния массива на основе натуральных АЭ измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором экспериментальных и теоретических исследований решена актуальная научная задача установления закономерностей влияния температурных воздействий на параметры акустической эмиссии при различных режимах механического нагружения каменной соли, что имеет важное значение для повышения эффективности использования акустико-эмиссионных измерений при решении задач геоконтроля, связанных с информационным обеспечением проектирования, строительства и эксплуатации подземных хранилищ газа в соляных отложениях.

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

1. Обоснована необходимость учёта реальных термобарических условий соляного массива в зоне размещения подземного хранилища газа при оценке свойств и состояния каменной соли методом акустической эмиссии на образцах.

2. Установлены закономерности проявления АЭ каменной соли при её одноосном нагружении с различной скоростью деформирования. Доказано, что по характерным особенностям активности акустической эмиссии можно надёжно идентифицировать стадии деформирования и устанавливать их границы, а также по положению последних оценивать определённые механические свойства каменной соли.

3. Установлено, что проявления АЭ образцов каменной соли, зависят как от скорости их одноосного деформирования, так и от температурных воздействий. С увеличением температуры происходит смещение относительных значений механических свойств, причем при более высокой скорости деформирования это смещение проявляется сильнее.

4. Установлены закономерности проявления акустической эмиссии в процессе деформирования образцов каменной соли при их нагружении по схеме Кармана и повышенных температурах. Особенности активности акустической эмиссии позволяют надёжно идентифицировать стадии деформирования и устанавливать их границы, положение которых позволяет оценивать определённые механические свойства каменной соли.

5. Экспериментально установлено, что при увеличении температуры в ходе нагружения каменной соли по схеме Кармана наблюдаются смещения относительных значений механических свойств в меньшую сторону.

6. Экспериментально установлены закономерности влияния температуры на процессы деформирования образцов каменной соли при их одноосном статическом нагружении, показана взаимосвязь с этими процессами активности акустической эмиссии, которая испытывает почти двукратное скачкообразное увеличение на границе перехода от устойчивой к прогрессирующей ползучести.

7. Установлены закономерности проявления акустической эмиссии при длительном нагружении образцов каменной в условиях трехосного сжатия и повышенных температур. Установлено, что в условиях длительного трехосного сжатия каменная соль не переходит в стадию прогрессирующей ползучести, однако на высоких температурах значительно возрастают скорость её деформирования и значения активности АЭ.

8. Выявлены особенности проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в каменной соли при её циклическом нагружении с возрастающим и повторяющимся от цикла к циклу максимальным напряжением при высоких температурах $T_2 \gg T_1$ (где T_1 – комнатная температура), а также при переходе от T_1 к T_2 и от T_2 к T_1 .

Список использованной литературы

1. В.А. Казарян. Подземное хранилище газов и жидкостей Т.1. Проектирование. Строительство.-М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2019. 844 с.
2. СП 123.13330.2012 Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. // Актуализированная редакция СНиП 34-02-99.
3. Liu H., Zhang, M., Liu, M., Cao L. Influence of natural gas thermodynamic characteristics on stability of salt cavern gas storage // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 227. P. 135-142.
4. Иванов А.А. Геология галогенных отложений (формаций) / А.А. Иванов, Ю.Ф. Левицкий // СССР. Москва. Госгеолтехиздат.- 1960.- 424 с.
5. Савоненков В.Г. Геохимические исследования подземных ядерных взрывов в каменной соли как аналогов захоронения РАО в соляных формациях / В.Г Савоненков, С.И. Шабалев // Санкт-Петербург.- 2014.- 272 с.
6. Мор О. Чем обусловлен предел прочности и временное сопротивление материала. // «Новые идеи в технике».- Сборник №1. Теория прочности.- Петроград.- Из-во «Образование».- 1915 г.
7. 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
8. 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.
9. 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

10. Halwany Sam Applied soil mechanics with ABAQUS applications / Sam Helwany // Library of Congress Cataloging – Publication Data. Publishing Wiley.- 2007.
11. Зильбершмидт В.Г., Зильбершмидт В.В., Наймарк О.Б. Разрушение соляных пород. М.: Наука, 1992, 144 с.
12. Мансуров В. А. Поведение горных пород при различных скоростях нагружения. Фрунзе: Изд-во «Илим», 1982, 88 с.
13. Мансуров В.А. Хрупкое разрушение горных пород. Фрунзе: Изд-во АН Киргизской ССР, 1984, 125 с.
14. Allemandou X., Dusseault M.B. Procedures for cyclic creep testing of salt rock, results and discussions. Proc. 3rd Conf. Mechanical Behavior of Salt, Palaiseau, 14-16.09.93, pp. 193-204.
15. 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.
16. 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
17. Wanyan Q., Shen X., Kou Y., Ran L. The analysis of the mechanical properties of typical salt rock // Journal of Southwest Petroleum University. 2016. V. 38. P. 60-67.
18. Zhao Y., Wen W. Mechanical properties of bedded rock salt // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. 2014. V. 19. P. 9347-9353.
19. 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.
20. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород. Екатеринбург: УрО РАН, 1996, 204 с.

21. Оксенкруг Е.С. Определение предела длительной прочности каменной соли в рассольной среде // Экспресс-информация. 1974, № 6, с. 18-19.
22. Оксенкруг Е.С. Исследование реологических свойств каменной соли для расчета деформаций подземных емкостей. Автореф. дис.... канд. техн. наук. М.: 1976, 24 с.
23. Константинова С.А., Вяткин А.П., Цурик С.П. Влияние увлажнения каменной соли на ее прочностные и деформационные свойства // Разработка соляных месторождений. Пермь: 1978, с. 115-119.
24. Оксенкруг Е.С., Шафаренко Е.М. Ползучесть и длительная прочность каменной соли//Основания, фундаменты и механика грунтов. 1974, №9, с.17-19.
25. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. М.: Недра, 1979, 301 с.
26. Ильинов М.Д. Разработка метода количественной оценки напряженного состояния горных пород в массиве по показателям механических свойств извлеченного керна. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., ВНИМИ, 1985, 20 с.
27. Тавостин М.Н. Обоснование и разработка методов определения реологических параметров каменной соли для оценки устойчивости подземных хранилищ. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГГУ, 2001, 151 с.
28. He M., Li N., Zhu C., Chen Y., Wu H. Experimental investigation and damage modeling of salt rock subjected to fatigue loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. V. 114. P. 17-23.
29. 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
30. Jiang D., Cui Y., Fan J., Chen J., Ren S. Experimental study of mechanical characteristics of salt rock under discontinuous cyclic loading //Rock and Soil Mechanics. 2017. V. 38. P. 1327-1334.

31. Ma L., Wang M., Zhang N., Fan P., Li J. A variable-parameter creep damage model incorporating the effects of loading frequency for rock salt and its application in a bedded storage cavern // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017. V. 50. P. 2495-2509.
32. Chen J., Du C., Jiang D., Fan J., He Y. The mechanical properties of rock salt under cyclic loading-unloading experiments // *Geomechanics and Engineering*. 2016. V. 10. P. 325-334.
33. Проскуряков Н.М., Пермьяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. Л.: Недра, 1973, 271 с.
34. Пермьяков Р.С., Соломинцев Г.Г., Гаркушин П.К. Исследование физико-механических свойств, процесса деформирования и разрушения соляных пород // *Тр. ВНИИГ*. Л.: 1974, вып. 67, с. 108-119.
35. 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
36. Кошелев А.Е. Обоснование и разработка метода определения механических свойств каменной соли с учетом начального поля напряжений. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГГУ, 2013, 143 с.
37. 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.
38. 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
39. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах: Справочник/ Е.И. Баюк, И.С. Томашевская, В.М. Добрынин и др.//Под ред. М.П. Воларовича. М.: Недра, 1988, 255 с

40. 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
41. U. Hunsche, A. Hampel. Rock salt – the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository. /Engineering geology 52 (1999) 271-291
42. Horseman S.T., Russell J.E. Slow experimental deformation of Avery Island salt. Proc. 7th Symp. On Salt, Kyoto, 1993, Vol. 1, pp. 67-74.
43. Lux K.H. Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrung im Salzkavernenbau. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart. 1984.
44. Hou Z. Untersuchungen zum Nachweis der Standsicherheit für Untertagedeponien im Salzgebirge. Claushal-Zellerfeld : Papierflieger, 1998, 375 p.
45. Константинова С.А. Ползучесть образцов каменной соли в условиях сложного напряженного состояния//Горн. журн. 1986, № 8, с. 1-5.
46. He M., Li N., Zhu C., Chen Y., Wu H. Experimental investigation and damage modeling of salt rock subjected to fatigue loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. V. 114. P. 17-23
47. 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
48. 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
49. Fan J., Chen J., Jiang D., Ren S., Wu J. Fatigue properties of rock salt subjected to interval cyclic pressure // International Journal of Fatigue. 2016. V. 90. P. 109-115.
50. 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

51. 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

52. Ma J., Wang Z., Zheng Y., Zhao Y. Creep deformation difference of bedded salt rocks and its additional stress // Acta Petrolei Sinica. 2014. V. 35. P. 178-183

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

54. 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

55. 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.

56. Иоффе А.Ф. Механические свойства кристаллов // Успехи физических наук. 1928. т.8. Вып.4 с.466-471

57. Виноградов С.Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. М.: Наука, 1964. с 84

58. Шамина О.Г. Упругие импульсы при разрушении образцов горных пород // Известия АН СССР, сер. Геофизическая. 1956. №5. с. 513-518

59. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (Обзор) // Акустический журнал, 2005, 51, Приложение с.6-18

60. Шкуратник В.Л. Филимонов Ю.Л. О взаимосвязи параметров акустической эмиссии с физико-механическими свойствами и процессами разрушения соляных горных пород // Геодинамика и напряженное состояние

недр Земли. Международная конференция 6-9 октября 2003 г. Новосибирск, 2004. с. 35-39

61. Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V. Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate. *Strain*, 2002. V.38. P. 157-159

62. Shkuratnik V.L. Yamschikov V.S. On the relationship between acoustic emission parameters and strength properties of rocks // *Mechanics of Jointed and Faulted Rock* / Ed. H. P. Rossmanith. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995. P. 469-471

63. Константинова А.Г. Сесмоакустические наблюдения при разрушении образцов Кизеловского угля // В сб.: Рудничная аэрогазодинамика и безопасность горных работ. М.: Наука, 1964. с. 155-162

64. Томилин Н.Г., Куксенко В.С. Иерархическая модель разрушения горных пород // В сб.: Науки о Земле: Физика и механика геоматериалов / Сост. А.В. Лавров. М.: Вузовская книга. 2002. с. 116-135

65. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Салов Б.Г., Бабичев О.В., Терентьев В.А., Патонин А.В., Мострюков А.О. Возбуждение акустической эмиссии упругими импульсами // *Физика Земли*. 2001. № 1. с. 79-84

66. Unander T.E. The effect of attenuation on b-values in acoustic emission measurements – a theoretical approach // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* 1993. V. 30. № 7. P. 947-950

67. Лавров А.В. Пространственная локализация разрушения как причина вариаций амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии и b-параметра // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 3.

68. Saichev A., Sornette D. Andrade. Omori and Time- to failure Laws from Thermal Noise in Material Rupture. Ar.: cond-mat/0311493

69. Горобец Л.Ж., Дуброва С.Б., Бовенко В.Н., Панченко О.Ф. Исследование акустоэмиссионных свойств природных материалов в режиме высоких давлений // *Физика и техника высоких давлений*. 1995. № 2. с. 65-73

70. Айтматов И.Т., Мансуров В.А. Акустическая эмиссия при хрупком разрушении горных пород // В сб.: Акустическая эмиссия материалов и конструкций (1-я Всесоюзная конференция). Часть 2. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1989. с. 111-116
71. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // Archiv fur das Eiesenhuttenwesen. 1953. V. 24. № 1/2. P. 43-45
72. Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах – М.: Издательства МГГУ, 2004. -456 с.
73. Goodman R.E. Subaudible noise during compression of rocks // Geol. Soc. Amer. Bull. 1963. № 4. P. 487-490
74. Panasiyan L.L. Kolegov S.A. Morgunov A.N. Stress memory studies in rock by means of acoustic emission // Proc. Int. Conf. Mech. Jointed and Faulted Rock (MJFR). – Rotterdam: A.A. Balkema. 1990. P. 435-439
75. Ямщиков В.С., Шкуратник В.Л., Лавров А.В. Эффекты памяти в горных породах (обзор) // ФТПРПИ. 1994. № 5. с. 57-69
76. Kurita R., Fujii N. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission // Geoph. Res. Letts. 1979. V.6. № 1. P. 9-12
77. Ржевский В.В., Ямщиков В.С., Шкуратник В.Л. Эмиссионные эффекты памяти в горных породах // Сб.: Эффекты памяти в горных породах. М.: МГИ. 1986. с. 6-21
78. Li C., Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect n rocks // Mech. Rock Engng. 1993. V. 26. № 4. P. 333-351
79. Holcomb D.J., Martin R.J. III. Determining peak stress history using acoustic emissions // Proc. 26 th U.S. Symposium on Rock Mechanics. Rotterdam: A.A. Balkema. 1985.V. 2. P.715-722
80. Shkuratnik V.L. Lavrov A.V. Dreidimensionale Computersimulation des Kaiser-Effektes von Gesteinsproben bei traxialer Belastung // Gluckauf – Forshungshefte. 1997. V. 58. № 2. P. 78-81

81. Лавров А.В., Филимонов Ю.Л., Шафаренко Е.М., Шкуратник В.Л. Экспериментальное исследование эффектов памяти в каменной соли при различных режимах циклического нагружения // В сб.: Физика и механика геоматериалов – М.: Вузовская книга, 2001. с. 73-79
82. He C., Okubo S., Nishimatsu Y. A study on the Class II behavior of Rock // Rock Mech Engng. 1990. V.23. № 4. P. 261-273
83. Nicolae M. Non-associated elasto-viscoplastic models for rock salt // Int. Journ. Engng Sci. 1999. V.37. № 3. P.269-297
84. Лавров А.В. Закономерности формирования и проявления эффектов памяти в горных породах. Дисс.д-ра техн. Наук. М.: МГГУ, 2001
85. Пермяков Р.О. Исследование физико-механических свойств, процесса деформирования и разрушения соляных пород / Г.Г. Соломенцев, П.К. Гаркушин // Труды ВНИИГалургии. Л.- 1974.- Вып. 67.- С. 108-119.
86. Li C. A theory for the Kaiser effect and its potential applications // Proc. 6th Conf. AE/MA in Geologic Structures and Materials. - Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech Publ. (Ed.: H.R.Hardy, Jr.), 1998, pp.171-185
87. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах: Справочник/ Е.И. Баюк, И.С. Томашевская, В.М. Добрынин и др.//Под ред. М.П. Воларовича. М.: Недра, 1988, 255 с
88. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии. Киев.: Изд-во «Наукова думка», 1969, 212 с
89. Дмитриев А.П., Кузьяев Л.С., Протасов Ю.И., Ямщиков В.С. Физические свойства пород при высоких температурах. М.: Недра, 1969
90. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая теория прочности твердых тел. М.: Наука, 1974, 560 с.
91. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термодинамические процессы в горных породах: Учеб для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. 360 с.

92. Tian H., Ziegler M., Kempka T. Physical and mechanical behavior of clay stone exposed to temperatures up to 1000° 1C. // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.– 2014. – 70. – p. 144–153
93. Haeri H., Shahriar K., Fatehmarji M., Moarefvand P. Experimental and numerical study of crack propagation and coalescence in pre-cracked rock-like disks1C // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2014. – 67. – p. 20–28
94. Li–yun L., Zhi–qiang X., Ming–xiu L., Yi.L., Chen F., Tie–Wu T. An experimental study of I–II–III mixed mode crack fracture of rock under different temperature. 13th International Conference on Fracture June 16–21, 2013, Beijing, China.
95. Pridj D.. General behavior of the salt dome with the burial ground placed in it. Materials of the Soviet-Belgian-Netherlands seminar, M., July, 1985
96. Scriapai T., Walsri C., Fuenkajorn K. Effect of temperature on compressive and tensile strengths of salt// Science Asia № 38. p.166-174
97. Brandao N. B. Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks / D. Roehl // Acta Geotechnica.- 2018.- V. 13.- P. 1329-1340
98. Zhai S., Wu G., Zhang Y., Wu X. Mechanical characteristics of salt rock subjected to uniaxial compression and high temperature // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2014. V. 33. P. 105-111
99. Wisetsaen S., Walsri C., Fuenkajorn K. Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. V. 73. P. 10-14
100. Liang W. G., Xu S. G., Zhao Y. S. Experimental study of temperature effects on physical and mechanical characteristics of salt rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2006. V. 39. P. 469-482.
101. Wisetsaen S., Walsri C., Fuenkajorn K. Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. V. 73. P. 10-14

102. Fang K., Li Y., Bi W., Wu J. Experimental study on high temperature shear strength parameter of salt rock // Proc. of the 2nd International Symposium of Mine Safety Science and Engineering. Beijing, Sep. 21-23, 2013/ Beijing: Hemisphere Publ., 2013. V. 1. P. 505-508

103. Sartkaew S., Fuenkajorn K. 2014. Effects of loading rate on strength and deformability of rock salt under 273-373 kelvin // Proc. of the 8th Asian Rock Mechanics Symposium. Sapporo, Oct., 14-16, 2014. Sapporo: Hemisphere Publ., 2014.V. 1. P. 191-197

104. Н. Картер, Ф. Хансен. Ползучесть каменной соли. Перевод, 1983.

105. Дж. Придж. Общее поведение соляного купола с размещенным в нем могильником. Материалы советско-бельгийско-нидерландского семинара, М., июль, 1985.

106. U. Hunsche, A. Hampel . Rock salt – the mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository//Engineering geology 52 (1999) 271-291.

107. Hampel, A.U.Hunsche (2001): Extrapolation of creep of rock salt with the composite model.- In:Basic and Applied Salt Mechanics; Proc. Of the Fifth Conf. on the Mech. Behavior of Salt (MECASALT V), Bucharest 1999. Editors: N.D. Cristescu, H.R. Hardy, Jr., R.O.Simionescu; p. 193 – 207. Balkema, Lisse.

108. Solution mining research institute (SMRI), Fall meeting 1998, Technical class. Guidelines for safety assessment of salt caverns.

109. Darrel E. Munson. Transient Analysis for the Multimechanism-Deformation Parameters of Several Domal Salts // Solution Mining research institute meeting paper, fall 1999.

110. Барбашова О.С. О влияния температура на скорость деформирования каменной соли. Горно-информационный аналитический журнал// Москва, 2010

111. Gao X., Yang C., Wu W., Liu, J. Experimental studies on temperature dependent properties of creep of rock salt // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2005. V. 24. V. 2054-2059

112. Chen J., Shi X., Zhou J. The mechanical characteristic of rock salt under uniaxial compression with low temperature effect // Functional Materials. 2016. V. 23. P. 433-436.

113. Кравченко О.С., Филимонов Ю. Л. Особенности деформирования каменной соли при повышенных температурах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 1. – С. 69–76.

114. Шкуратник В.Л., Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Экспериментальное исследование зависимостей акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли от напряжений и температуры // ФТРПИ.- 2019.-№4.- С. 20-27.

115. Кравченко О.С. Закономерности акустической эмиссии, продольных и объемных деформаций каменной соли при ее нагружении по схеме Кармана и температурных воздействиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 4. – С. 96–104.

116. Шкуратник В.Л., Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Закономерности акустической эмиссии каменной соли при различных скоростях одноосного деформирования и температурном воздействии // Прикладная механика и техническая физика. – 2020.-Т.61. - № 3. С. 190-197

117. Шкуратник В.Л., Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Особенности проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в условиях изменяющихся температурных воздействий // ФТРПИ.- 2020.-№.- С. 58-64

118. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. В 2-ух томах. Том 2. Лабораторные методы/Под.Ред. Е.М. Сергеева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра. 1984. С.438.

119. Фролов В.Е. Литология. Кн.2. М.: МГУ, 1993, 432 с.

120. Логвиненко Н. В., Сергеева Э. И. Методы определения осадочных пород: Учебн пособие для вузов. М.: Недра, 1986, 240 с.

121. Атлас структур и текстур галогенных пород СССР. Авт.: Яржемский Я.Я., Протопопов А.Л., Лобанова В.В. и др. Л.: Недра, 1974, 231 с.

122. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1991, с. 16.

123. . Физика горных пород и процессов. Термины и определения. Учебное пособие. Тюльнина В.П., Хаютин Ф.Д., Христолюбов В.Д., Янченко Г.Ф. М.: МГГУ, 1998, 145 с.