

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**

---

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

**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»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Научный руководитель – доктор технических наук, профессор -  
Шкуратник Владимир Лазаревич**

Москва, 2020

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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°C 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 надёжно 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 132 источников, содержит 52 рисунка и 9 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* анализируется современное состояние методов изучения свойств и состояния соляных пород применительно к задачам проектирования, строительства и эксплуатации ПХГ и, прежде всего, метода АЭ. На основе этого анализа сформулированы указанная выше цель диссертационного исследования и следующие задачи, решить которые необходимо для её достижения.

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.

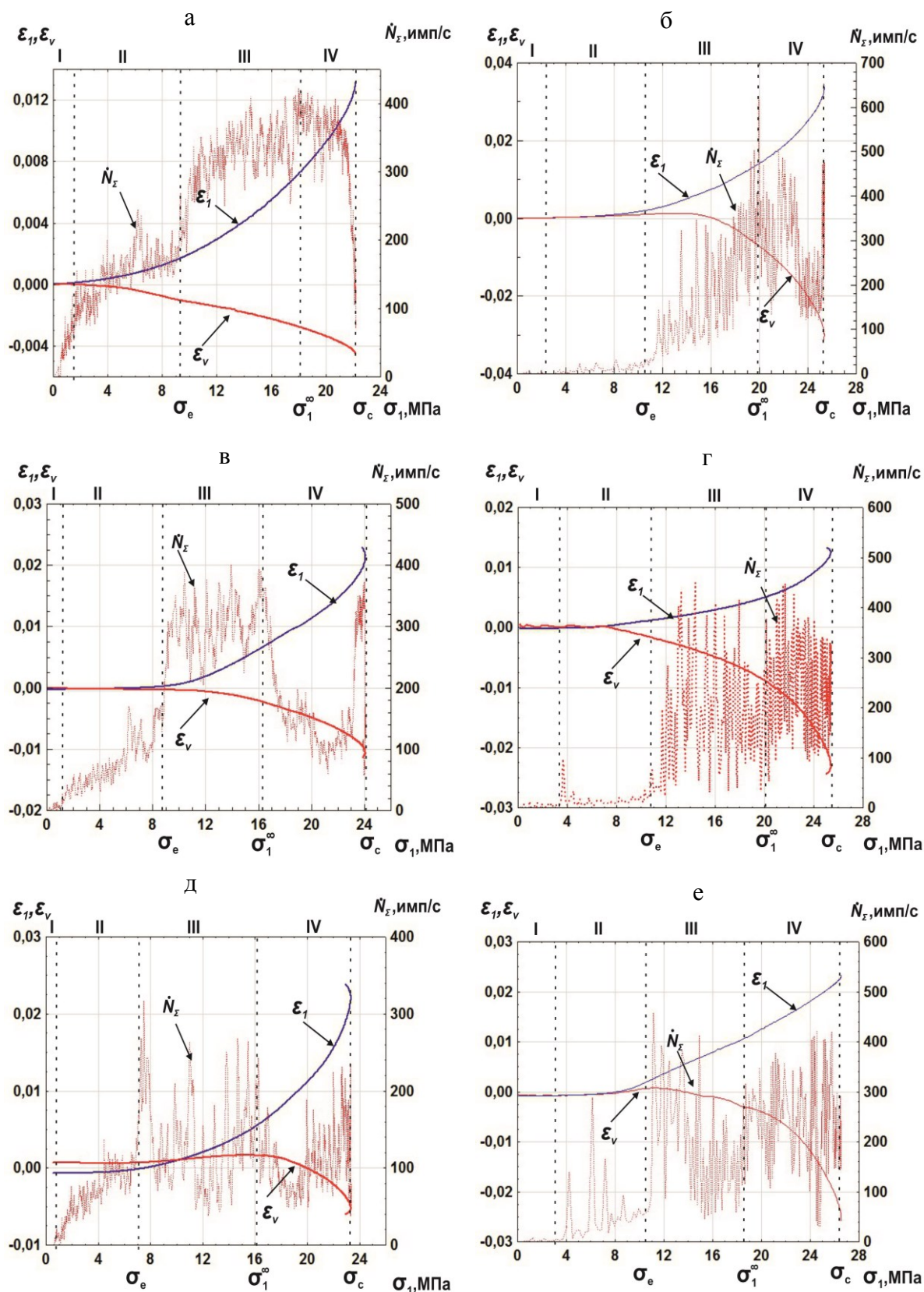
**Вторая глава** посвящена экспериментальным исследованиям деформационных и акустико-эмиссионных свойств каменной соли при различных режимах механического нагружения и повышенных температурах.

Экспериментально были исследованы закономерности АЭ каменной соли при различных скоростях  $\dot{\varepsilon}_1=0,3$  и  $\dot{\varepsilon}_2=0,03$  мм/мин одноосного деформирования образцов и температурных воздействиях  $T_1=23$  °С,  $T_2=40$  °С и  $T_3=60$  °С. Для каждой из температур  $T_i$  и скоростей деформирования  $\dot{\varepsilon}_1$  и  $\dot{\varepsilon}_2$  были получены представленные на рис. 1, характерные для всей исследованной выборки образцов зависимости, отражающие изменения продольной  $\varepsilon_l$  и объёмной  $\varepsilon_v$  деформаций, а также активности АЭ  $\dot{N}_\Sigma$  каменной соли в функции от напряжения  $\sigma_1$ .

Анализ экспериментальных данных показал, что АЭ в процессе деформирования каменной соли носит не монотонный характер, имеет свои индивидуальные особенности при каждой конкретной температуре и скорости деформирования образцов. В тоже время по характерным изменениям параметра  $\dot{N}_\Sigma$  на всех графиках можно выделить 4 стадии деформирования (для которых характерны определённые качественные структурные изменения): начальную (I), линейно-упругую (II), упругопластическую (III), разрушения (IV). Границы между ними на рис.1 отмечены пунктирными линиями. Выявление этих границ по достаточно плавным зависимостям  $\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$  и  $\varepsilon_v = f(\sigma_1)$  затруднительно. В то же время, характерные изменения параметра  $\dot{N}_\Sigma$ , на границах стадий деформирования обеспечивают достаточно точное их определение.

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

По положению верхних границ II, III и IV стадий деформирования могут быть оценены пределы упругости  $\sigma_e$  длительной прочности  $\sigma_1^\infty$  и прочности при сжатии  $\sigma_c$  каменной соли. В табл. 1 приведены экспериментально полученные при различных скоростях деформирования и температурах значения  $\sigma_e/\sigma_c$  и  $\sigma_1^\infty/\sigma_c$ .



**Рисунок 1-** Зависимости  $\varepsilon_1 = f(\sigma_1)$ ,  $\varepsilon_v = f(\sigma_1)$  и  $\dot{N}_x = f(\sigma_1)$ , полученные в процессе нагружения образцов каменной соли со скоростями деформирования  $\dot{\varepsilon}_1 = 0,3$  мм/мин (а, в, д) и  $\dot{\varepsilon}_2 = 0,03$  мм/мин (б, г, е) при различных температурах: а, б-  $T=23$  °C, в, г-  $T=40$  °C, д, е-  $T=60$  °C.

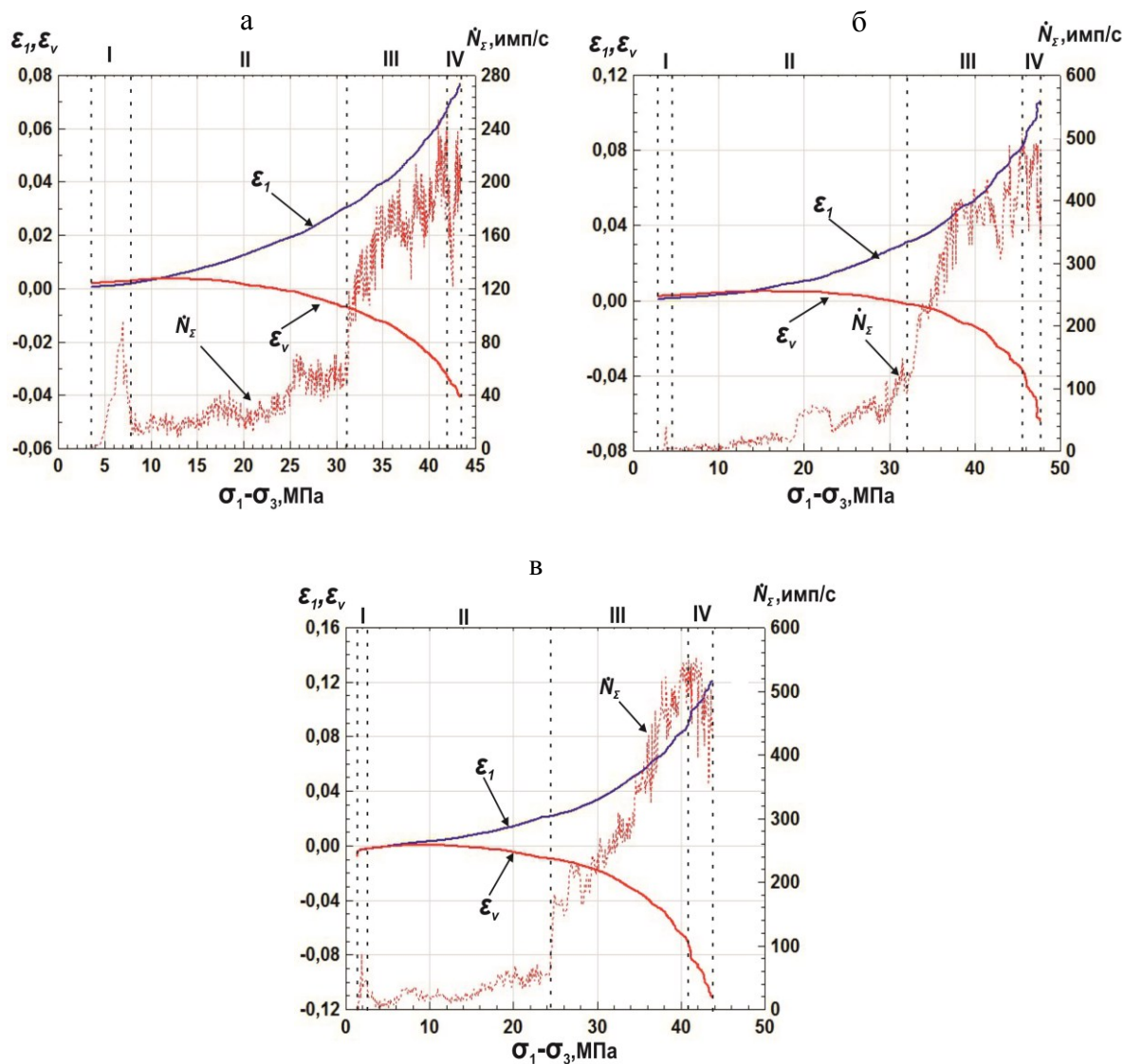
Как видно из табл.1 с увеличением температуры относительные значения  $\sigma_e/\sigma_c$  и  $\sigma_1^\infty/\sigma_c$  уменьшаются, причём в большей степени для скорости деформирования  $\dot{\epsilon}_1$ , чем для скорости  $\dot{\epsilon}_2$ .

**Таблица 1** - Относительные значения  $\sigma_e/\sigma_c$  и  $\sigma_1^\infty/\sigma_c$  образцов каменной соли

| Относительные<br>значения<br>механических<br>характеристик | Скорости деформирования $\dot{\epsilon}_i$ , мм/мин |      |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
|                                                            | 0,3                                                 |      |      | 0,03 |      |      |
|                                                            | Значения температур $T_i$ , °C                      |      |      |      |      |      |
|                                                            | 23                                                  | 40   | 60   | 23   | 40   | 60   |
| $\sigma_e/\sigma_c$                                        | 0,42                                                | 0,38 | 0,29 | 0,44 | 0,43 | 0,41 |
| $\sigma_1^\infty/\sigma_c$                                 | 0,84                                                | 0,70 | 0,62 | 0,81 | 0,80 | 0,72 |

Были получены представленные на рис. 2 зависимости продольной  $\epsilon_l$  и объемной  $\epsilon_v$  деформаций, а также активности АЭ  $\dot{N}_\Sigma$  в функции от девиатора напряжений  $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$  образца каменной соли, нагружаемого по схеме Кармана при трёх различных температурах  $T_i$  ( $T=23^\circ\text{C}$ ,  $T=40^\circ\text{C}$  и  $T=60^\circ\text{C}$ ). Как и в случае одноосного нагружения образца изменение продольных  $\epsilon_l$  и объемных  $\epsilon_v$  деформаций носит здесь достаточно плавный характер, не проявляя на границах стадий деформирования каких-либо явных аномалий, позволяющих однозначно идентифицировать эти границы. В то же время по характерным особенностям активности АЭ указанные границы выделяются. Отмечено также, что при трёхосном нагружении образцов, как и при одноосном, увеличение температуры приводит к смещению границ между стадиями деформирования. При этом в пределах каждой стадии деформирования активность АЭ более стационарна и содержит существенно меньше аномальных выбросов.

По положению границ между II и III, а также III и IV стадиями деформирования можно оценить относительные значения предела упругости  $\sigma_e$  и предела длительной прочности  $\sigma_1^\infty$  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 табл. 2, из которой следует, что с увеличением температуры относительные значения пределов упругости и длительной прочности уменьшаются, а сами значения  $\sigma_e$  и  $\sigma_1^\infty$  существенно выше, чем в экспериментах при одноосном нагружении образцов.



**Рисунок 2** - Зависимости  $\varepsilon_1 = f(\sigma_1 - \sigma_3)$ ,  $\varepsilon_v = f(\sigma_1 - \sigma_3)$  и  $\dot{N}_x = f(\sigma_1 - \sigma_3)$  образцов каменной соли при постоянной скорости их осевого нагружения и боковом давлении  $\sigma_2 = \sigma_3 = 5$  МПа для  $T = 23^\circ\text{C}$  (а),  $T = 40^\circ\text{C}$  (б) и  $T = 60^\circ\text{C}$  (в)

**Таблица 2** - Относительные значения механических характеристик образцов каменной соли при трёхосном нагружении и различных температурах

| Относительные значения механических характеристик | Значения температур $T_i, ^\circ\text{C}$ |      |      |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|------|------|
|                                                   | 23                                        | 40   | 60   |
| $\sigma_e / (\sigma_1 - \sigma_3)$                | 0,69                                      | 0,64 | 0,54 |
| $\sigma_1^\infty / (\sigma_1 - \sigma_3)$         | 0,96                                      | 0,93 | 0,92 |

В *третьей главе* представлены акустико-эмиссионные и деформационные характеристики образцов каменной соли в условиях квазистатического одноосного и трёхосного напряженного состояния и ступенчато возрастающего термического воздействия.

Для проведения исследований в условиях одноосного напряженного состояния было отобрано 27 образцов, которые были разделены на 3 группы.

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  $10^\circ\text{C}$  нагревался в диапазоне температур от 20 до  $80^\circ\text{C}$ . При этом длительность ступени составляла 24 часа.

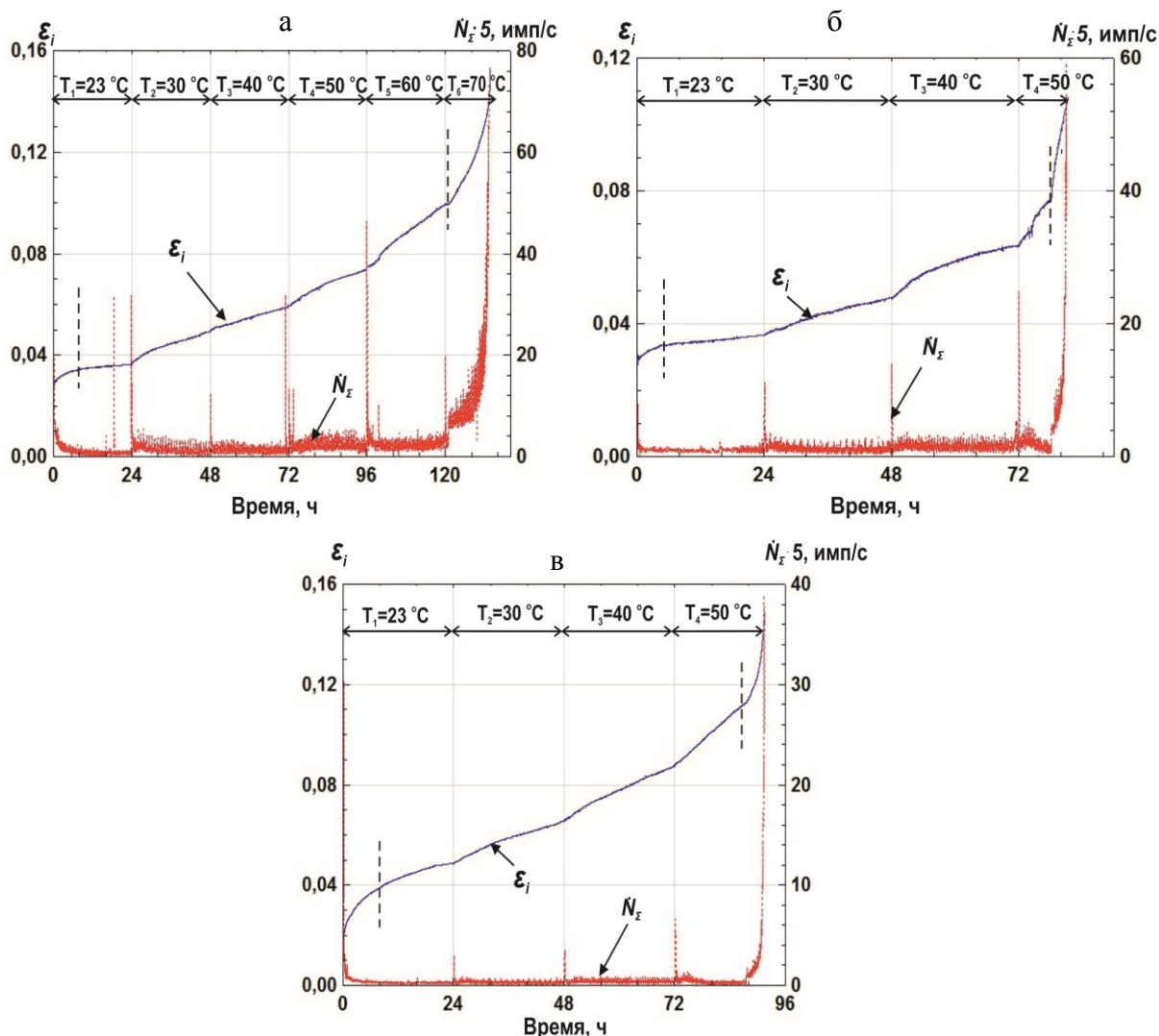
По результатам экспериментов, проведенных в условиях одноосного напряженного состояния, были получены представленные на рис. 3 зависимости, отражающие изменения параметров  $\varepsilon_i$  и  $\dot{N}_\Sigma$  в функции от времени  $t$  и температуры  $T$  для трёх различных значений осевых напряжений  $\sigma_1$ .

Анализ этих зависимостей показывает, что даже при  $\sigma_1=\text{const}$ , характер и значения параметров  $\varepsilon_i$  и  $\dot{N}_\Sigma$  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 величины  $\varepsilon_i$  нежели для  $\dot{N}_\Sigma$ .

С переходом на каждую последующую ступень температурного воздействия крутизна  $S$  зависимостей  $\varepsilon_i=f(T, \sigma_1=\text{const})$  возрастает. На всех указанных ступенях, кроме первой и последней, такое возрастание относительно линейно. Поэтому количественно его можно оценить углом наклона  $\alpha$  касательной к кривой  $\varepsilon_i=f(T)$  в точке, соответствующей центру каждой ступени, для которой  $T_i=\text{const}$ . На первой и последней температурных ступенях график  $\varepsilon_i=f(T)$  носит ярко выраженный нелинейный характер. В связи с этим каждый из указанных интервалов на рис. 3 разделён пунктирной линией на два подинтервала (начальный и конечный) и соответствующая касательная строилась только по отношению к центру конечного интервала. Значения углов  $\alpha$  для различных величин  $\sigma_1$  и температурных интервалов, а также средние за соответствующий температурный интервал значения активности АЭ  $\dot{N}_{\Sigma cp}$  приведены в табл. 3.

Как видно из рис. 3 и данных табл. 3, на стадии устойчивой ползучести изменение параметров  $\alpha$  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  $\alpha$ , так и среднего значения активности АЭ  $\dot{N}_{\Sigma cr}$ .



**Рисунок 3** - Графики изменения интенсивности деформаций сдвига  $\epsilon_i$  и активности АЭ  $\dot{N}_\Sigma$  в образце каменной соли при ступенчатом изменении температуры  $T$  и одноосном напряженном состоянии  $\sigma_1 = 18$  МПа (а),  $\sigma_1 = 19$  МПа (б) и  $\sigma_1 = 20$  МПа (в)

Учитывая, что в пределах каждой группы образцов значение  $\sigma_1 = \text{const}$ , можно считать, что все изменения параметров  $\alpha$  и  $\dot{N}_{\Sigma cr}$  связаны только с термическим воздействием. На последнем температурном интервале такое воздействие вызывает триггерный эффект, проявляющийся переходом от установившейся к прогрессирующей ползучести.

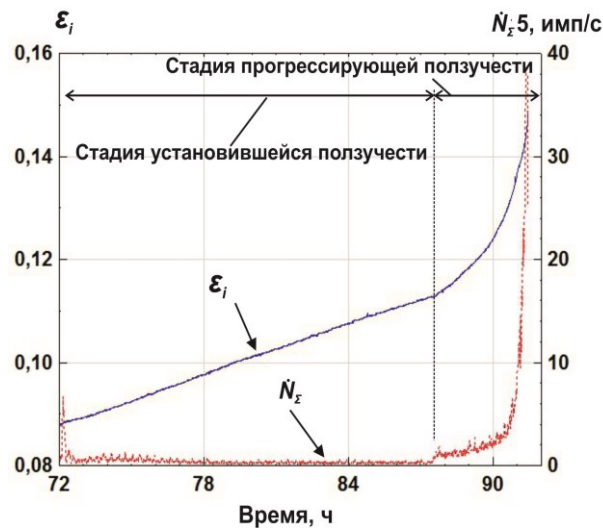
Переход от устойчивой к прогрессирующей ползучести сопровождается существенно большими изменениями акустико-эмиссионного информативного параметра  $\dot{N}_{\Sigma cr}$ , чем деформационного  $\alpha$ .

**Таблица 3** - Углы, характеризующие крутизну деформационных кривых, и средняя активность АЭ на различных температурных ступенях

| Напряжение,<br>$\sigma_1$ , МПа | Температура<br>$T, ^\circ\text{C}$ | Угол $\alpha$ ,<br>град | Средняя активность<br>$\dot{N}_{\Sigma \text{ ср}}$ , 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                                                          |

Перспективность использования акустико-эмиссионных измерений для установления момента перехода каменной соли от стадии установившейся к стадии прогрессирующей ползучести наглядно иллюстрируется представленными на рис. 4 зависимостями  $\varepsilon_i(t)$  и  $\dot{N}_{\Sigma}(t)$  на температурной ступени  $T=50^\circ\text{C}$ , которые получены в условиях одноосного нагружения при  $\sigma_1=20$  МПа. На границе между этими 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 момент перехода к прогрессирующей ползучести может быть установлен и по точке перехода от линейного к нелинейному участку зависимости  $\varepsilon_i(t)$ . Однако, для этого потребовалось бы регистрировать всю указанную зависимость и использовать для получения искомой информации относительно сложные технические решения.



**Рисунок 4** - Графики изменения интенсивности деформаций сдвига  $\varepsilon_i$  и активности АЭ  $\dot{N}_\Sigma$  в образце каменной соли при постоянном значении температуры  $T=50\text{ }^\circ\text{C}$  и одноосном напряженном состоянии  $\sigma_1=20\text{ МПа}$

Кроме того, следует иметь ввиду, что АЭ 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.

Для проведения исследований в условиях сложнапряженного состояния было отобрано 27 образцов, которые были разделены на 3 группы.

Образцы каждой группы подвергались трехосному нагружению при трех различных осевых напряжениях ( $\sigma_1=20\text{ МПа}$  для 1-ой группы,  $\sigma_1=25\text{ МПа}$  для 2-ой группы и  $\sigma_1=30\text{ МПа}$  для 3-ей группы) и постоянном боковом  $\sigma_3=5\text{ МПа}$ . Затем в испытаниях, где осевое напряжение составляло  $\sigma_1=20\text{ МПа}$  и  $\sigma_1=25\text{ МПа}$ , образцы нагревались от  $20$  до  $80\text{ }^\circ\text{C}$  ступенчато с шагом в  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , а в испытании где  $\sigma_1=30\text{ МПа}$ , нагрев осуществлялся от  $20$  до  $60\text{ }^\circ\text{C}$  с тем же шагом. Длительность каждой температурной ступени составляла 24 часа.

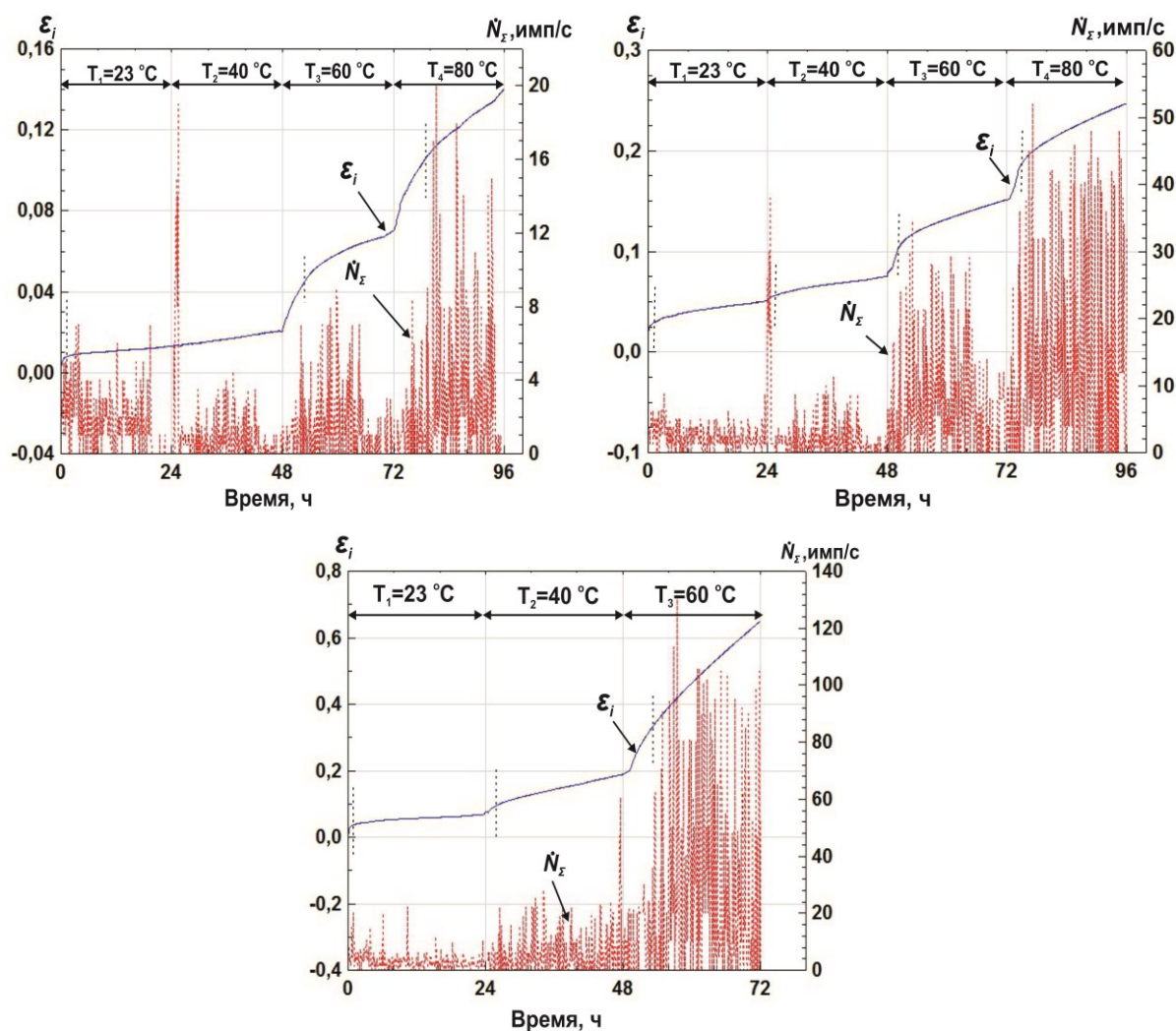
По результатам экспериментов были получены зависимости, отражающие изменения интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  и активности акустической эмиссии  $\dot{N}_\Sigma$  в функции от времени  $t$  и температуры  $T$  в условиях трехосного сжатия при трех различных осевых напряжениях и постоянном боковом  $\sigma_3=5\text{ МПа}$ .

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  $\varepsilon_l$  и  $\varepsilon_i$  с ростом температуры достаточно сильно изменяются, что объясняется её влиянием на пластичность каменной соли. Также обращает на себя

внимание, что на всех температурных ступенях изменения деформаций существенно больше, чем активности АЭ. В трехосном состоянии переход на каждую последующую ступень температурного воздействия сопровождается возрастанием крутизны зависимостей  $\varepsilon_I=f(T, \sigma_d)$  и  $\varepsilon_{II}=f(T, \sigma_d)$ , где  $\sigma_d$  - девиатор напряжений ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ). Такая же тенденция наблюдалась и в экспериментах при одноосном нагружении. В трехосном напряженном состоянии при переходе на каждую последующую температурную ступень сначала наблюдается ярко выраженный нелинейный характер изменения кривых, затем линейный. Угол наклона  $\alpha$ , который получен путем проведения касательной к кривым  $\varepsilon_I=f(T)$  и  $\varepsilon_{II}=f(T)$  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), границы между которыми на рис.5 показаны пунктирными линиями. Соответствующий угол наклона кривой определялся путём проведения касательной в центральной точке линейного участка. Значения углов  $\alpha$  для различных значений  $\sigma_d$  и температур, а также средние значения активности АЭ  $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$  за указанный температурный интервал приведены в табл.4.

**Таблица 4** - Углы, характеризующие крутизну зависимостей  $\varepsilon_I=f(T, \sigma_d)$  и средняя активность АЭ  $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$  на различных температурных ступенях

| Девиатор напряжений $\sigma_d$ , МПа | Температура, °С | Угол $\alpha$ , град | Средняя активность $\dot{N}_{\Sigma \text{cp}}$ , 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                                                    |



**Рисунок 5** - Графики изменения интенсивности деформаций  $\varepsilon_i$  и активности АЭ  $\dot{N}_\Sigma$  в образцах каменной соли при ступенчатом изменении температуры  $T$  и трёхосном напряженном состоянии с  $\sigma_d=15$  МПа,  $\sigma_d=20$  МПа и  $\sigma_d=25$  МПа.

Как видно из рис.5 и данных табл. 4, 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  $\sigma_d$ , тем больше угол наклона на каждой температурной ступени. Максимальный угол наклона  $\alpha=39$  град имеет место при  $\sigma_d=25$  МПа и  $T=60^\circ\text{C}$ . Однако и при этих параметрах перехода к прогрессирующей ползучести не наблюдается. Это обусловлено препятствующим процессу ползучести боковым давлением. Напомним, что в одноосном состоянии переход в прогрессирующую ползучесть наблюдался при углах  $\alpha = 55-60$  градусов. В то же время, при трёхосном нагружении значительное возрастание угла  $\alpha$  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 образца в стадию прогрессирующей ползучести.

В *четвертой главе* отражены результаты лабораторных исследований по изучению влияния температурных воздействий на проявления акустико-эмиссионного (АЭ) эффекта памяти (ЭП) образцов каменной соли при их циклическом одноосном нагружении с возрастающим от цикла к циклу максимальным уровнем напряжения и с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле.

Для проведения экспериментов по циклическому нагружению с возрастающим от цикла к циклу максимальным уровнем напряжений было отобрано 27 образцов, разделенных на 3 группы. Это обеспечивало необходимое для гарантированной достоверности получаемых результатов дублирование. Указанные результаты качественно совпадали у всех образцов соответствующей группы, поэтому ниже они представлены экспериментальными данными, полученными только на одном из входящих в группу образцов.

В каждой группе из 9-и 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  $\sigma_{\max}$  и минимальных  $\sigma_{\min}$  напряжений в цикле. Поскольку результаты у всех образцов соответствующей группы качественно совпадали, то ниже они представлены экспериментальными данными, полученными только на одном из входящих в группу образцов. Эти этапы отличались режимами проведения испытаний: температурой  $T_i$ , значениями максимальных  $\sigma_{\max}$  и минимальных  $\sigma_{\min}$  напряжений в цикле.

На первом этапе при температуре  $T=23^{\circ}\text{C}$  образцы первой группы подвергались трём циклам одноосного нагружения – разгрузки с максимальными значениями напряжений  $\sigma_{\max(\text{I})}=3$  МПа,  $\sigma_{\max(\text{II})}=6$  МПа и  $\sigma_{\max(\text{III})}=9$  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  $40^{\circ}\text{C}$ . На этом этапе образцы подвергались трём циклам одноосного нагружения – разгрузки с максимальными значениями напряжений  $\sigma_{\max(\text{I})}=12$  МПа,  $\sigma_{\max(\text{II})}=15$  МПа и  $\sigma_{\max(\text{III})}=18$  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  $\sigma_{\max(\text{I})}=3$  МПа,  $\sigma_{\max(\text{II})}=6$  МПа и  $\sigma_{\max(\text{III})}=9$  МПа в каждом цикле соответственно. При этом, минимальные значения напряжений в каждом из трёх циклов составляли  $\sigma_{\min(\text{I})} = \sigma_{\min(\text{II})} = 2,2$  МПа,  $\sigma_{\min(\text{III})} = 2,8$  МПа соответственно.

Во второй и третьей группах образцов проводились эксперименты аналогичные эксперименту в первой группе с той лишь разницей, что максимальная температура второго этапа в них составляла  $60^{\circ}\text{C}$  и  $80^{\circ}\text{C}$  соответственно.

Характерные зависимости активности АЭ для образца из первой группы в функции от циклически изменяющегося одноосного напряжения и различных значений температур  $\dot{N}_{\Sigma}=f(\sigma_1, T_i)$  представлены на рис.6.

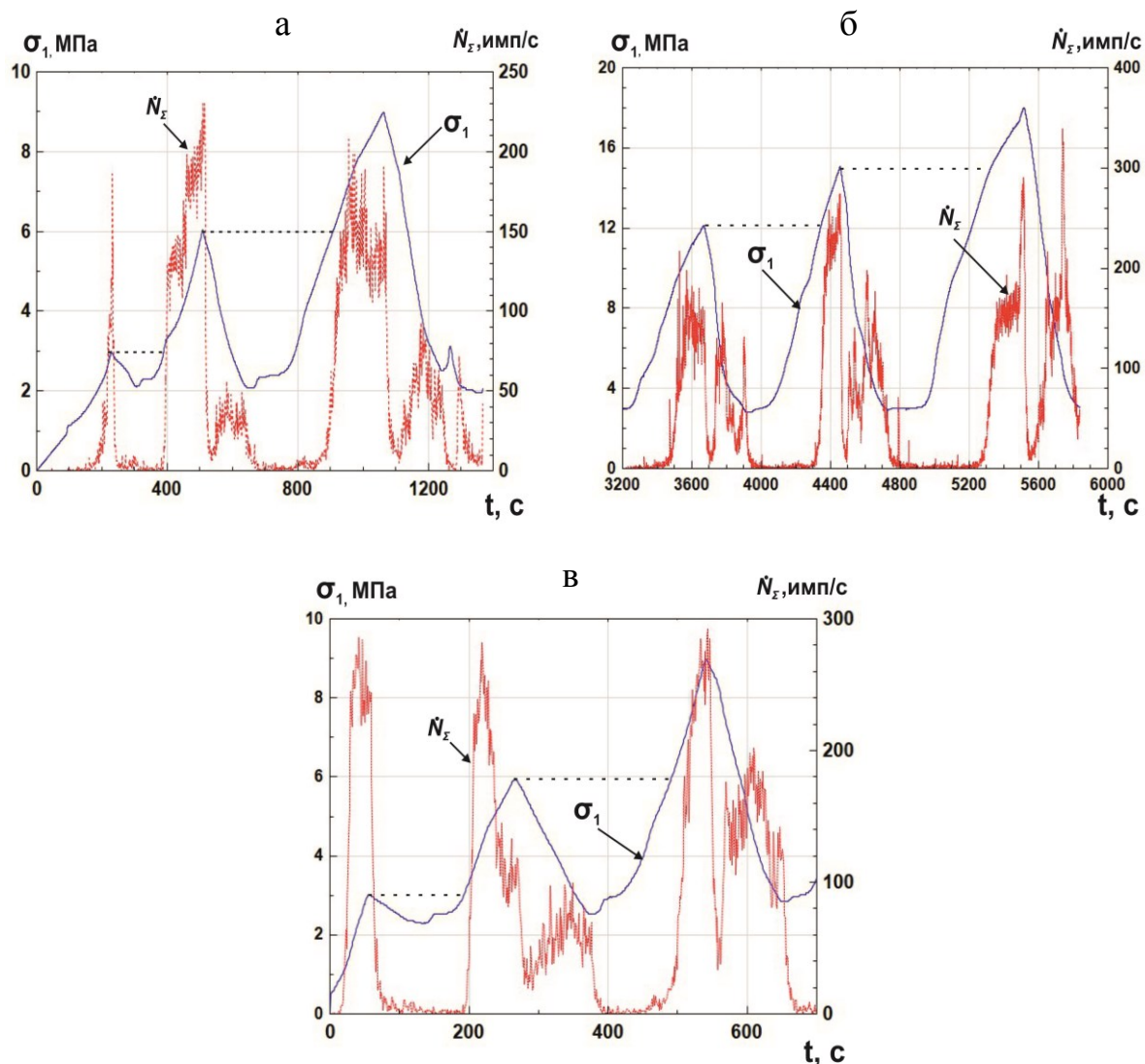
Как следует из результатов эксперимента с первой группой образцов (рис. 6а), цикл I одноосного механического нагружения образца сопровождается значимым ростом активности АЭ  $\dot{N}_{\Sigma}$  при уровне напряжения  $\sigma_1 \approx 1,5 \text{ МПа} \approx 0,062 \sigma_c$ , соответствующего началу интенсивного дефектообразования в каменной соли.

Увеличение  $\dot{N}_{\Sigma}$  до максимального значения  $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$  заканчивается с началом снижения величины  $\sigma_1$ . В этот момент значение  $\dot{N}_{\Sigma}$  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  $\dot{N}_{\Sigma}$  имеют место и в цикле III, где увеличение  $\dot{N}$  от  $\approx 0$  до  $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$  происходит скачком в момент, когда  $\sigma_1$  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  $\dot{N}_{\Sigma}$ , 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 рис. 6б, 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.



**Рисунок 6** - Зависимости  $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$  при циклическом нагружении образцов каменной соли первой группы с возрастающим от цикла к циклу максимальным напряжением при температурах  $T_1=23\text{ }^\circ\text{C}$  (а),  $T_2=40\text{ }^\circ\text{C}$  (б),  $T_3=23\text{ }^\circ\text{C}$  (в)

На остальных двух циклах нагружения второго этапа АЭ ЭП проявляется, как и на первом этапе, достаточно чётко. Скачок  $\dot{N}_\Sigma$  в цикле II имеет место при  $\sigma_{1\max}$  цикла I, а скачок  $\dot{N}_\Sigma$  в цикле III при  $\sigma_{1\max}$  цикла II. В то же время, наблюдаемый на стадиях разгрузки всех трёх циклов всплеск  $\dot{N}_\Sigma$  при  $T=40\text{ }^\circ\text{C}$  имеет существенно большие относительно  $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$  значения, чем при  $T=23\text{ }^\circ\text{C}$ .

При переходе к третьему этапу эксперимента, то есть при снижении температуры от  $T=40\text{ }^\circ\text{C}$  до  $T=23\text{ }^\circ\text{C}$ , информация о  $\sigma_{1\max}$  цикла III второго этапа не сохраняется. Из рис.6в видно, что значительный рост  $\dot{N}_\Sigma$  в цикле I наблюдается сразу с ростом  $\sigma_1$ , 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  $\dot{N}_\Sigma$  относительно  $\dot{N}_{\Sigma(\max)}$  по сравнению со вторым этапом существенно уменьшаются.

Основные закономерности АЭ ЭП, установленные в первой группе образцов справедливы и для экспериментов, проведенных во второй и третьей группах образцов, несмотря на то, что на втором этапе в этих группах температура образцов составляла уже не 40°C, а 60°C и 80°C соответственно.

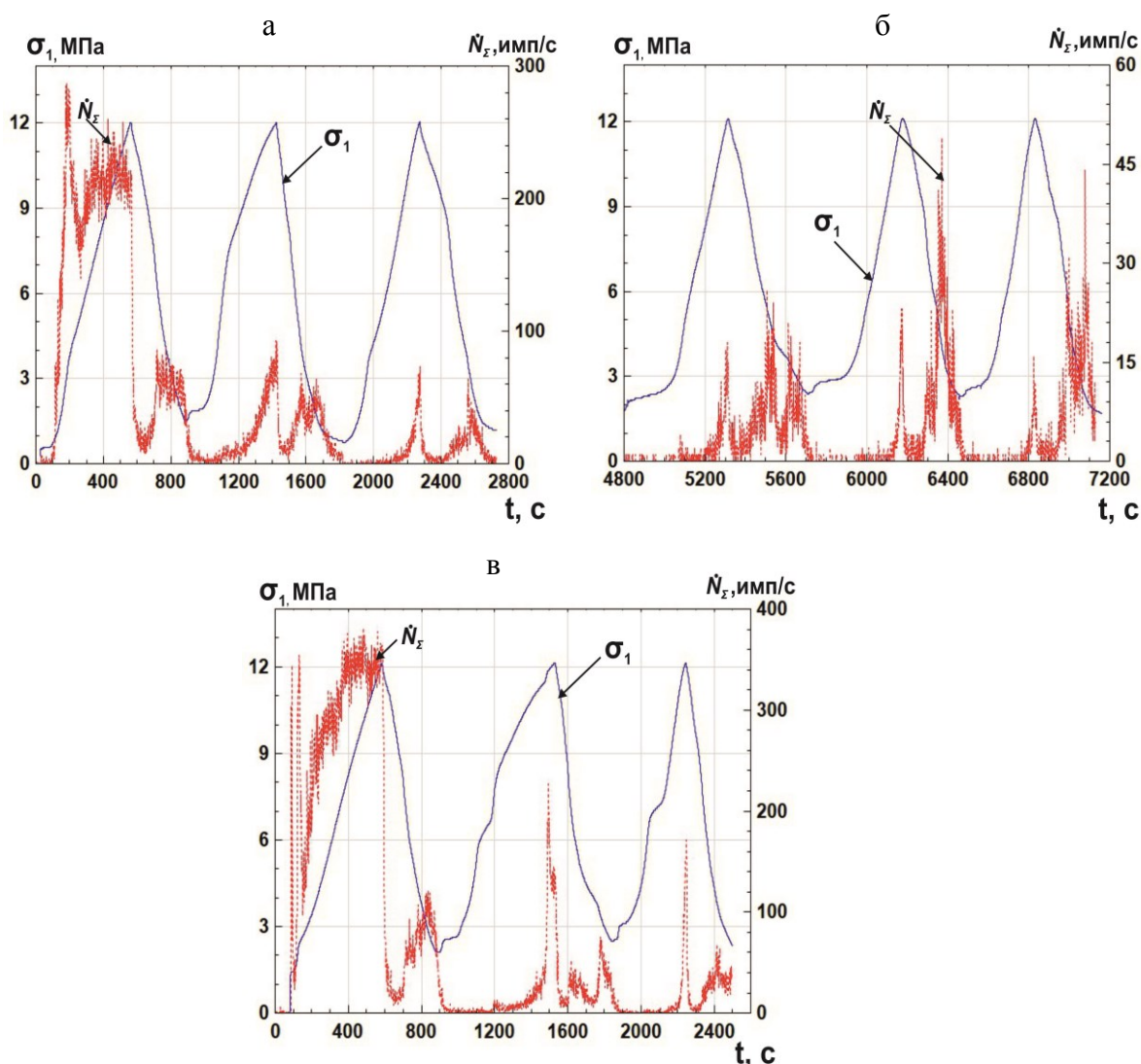
Особенности проявления АЭ ЭП образцов каменной соли в условиях одноосного циклического нагружения с постоянным максимальным напряжением в каждом цикле и изменяющейся температуре исследовались на выборке из 18 образцов, которые были разделены на 2 равные группы. Таким образом, всего было произведено 18 экспериментов, что обеспечивало необходимое для получения достоверных результатов дублирование. Указанные результаты качественно совпадали у всех образцов соответствующей группы, поэтому ниже они представлены данными, полученными на одном из входящих в группу образцов.

Эксперимент в каждой группе образцов включал 3 этапа исследования одного и того же образца каменной соли. Эти этапы отличались режимами проведения испытаний: температурой  $T_i$ , значениями минимальных  $\sigma_{\min}$  напряжений в цикле. При этом значения  $\sigma_{\max}$  в цикле были одинаковыми, то есть  $\sigma_{\max(I)} = \sigma_{\max(II)} = \sigma_{\max(III)} = 12$  МПа. Причём, 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  $T=23^\circ\text{C}$ .

Характерные зависимости активности АЭ образца каменной соли из первой группы в функции от циклически повторяющегося одноосного напряжения и различных значений температур  $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1, T_i)$  представлены на рис.7, из которого видно, что и при таком режиме нагружения АЭ ЭП, хотя и менее чётко, но всё же проявляется. При  $T=23^\circ\text{C}$  устойчивый рост активности АЭ  $\dot{N}_\Sigma$  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  $\dot{N}_\Sigma$  в цикле  $n$  к  $\sigma_{1\max}$  цикла  $n-1$ )  $FR \approx 0,75$ .

Как видно из рис. 7б при переходе ко второму этапу эксперимента, то есть к температуре  $T=40^\circ\text{C}$ , 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  $T=23^\circ\text{C}$ .

Обращает также на себя внимание, запаздывание перехода от возрастающих к уменьшающимся значениям  $\dot{N}_\Sigma$  относительно момента такого перехода напряжениями.



**Рисунок 7** - Зависимости  $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_1)$  при циклическом нагружении образца каменной соли из первой группы с постоянными максимальными напряжениями в каждом цикле при температуре  $T_1=23$  °C на первом этапе (а),  $T_2=40$  °C на втором этапе (б),  $T_3=23$  °C на третьем этапе (в)

При переходе к третьему этапу на  $T=23^\circ\text{C}$  (рис.7в) рост  $\dot{N}_\Sigma$  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  $\dot{N}_\Sigma$ .

Во второй группе образцов, эксперимент был аналогичен тому, который проводился в первой группе, и отличался по сути лишь максимальной температурой второго этапа, которая составляла  $60$  °C. При этом основные

закономерности АЭ ЭП, установленные в экспериментах оставались теми же, что и в экспериментах, проводимых в первой группе образцов.

## **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  $T_1$ .

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

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

2. 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.

3. 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.

4. 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

5. Шкуратник В.Л., Кравченко О.С., Филимонов Ю.Л. Особенности проявления акустико-эмиссионного эффекта памяти в условиях изменяющихся температурных воздействий // ФТРПИ.- 2020.-№ 2.- С. 58-64.

6. Кравченко О.С. Особенности деформирования каменной соли при повышенных температурах // XII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика). Сборник тезисов. Секция 4. -М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2017. - С.152.

7. Кравченко О.С. Определение и взаимосвязь акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли при повышенных температурах для строительства ПХГ//XIII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности (газ, нефть, энергетика). Сборник тезисов. Секция 4. -М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2019. - С.250-251.

8. Кравченко О.С. Определение и взаимосвязь акустико-эмиссионных и реологических характеристик каменной соли при длительных испытаниях в условиях повышенных температур при создании ПХГ// VIII Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преимущество». Сборник тезисов. Секция 2. -М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ». - С. 42.