

УДК 620.179.17

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КАМЕННОЙ СОЛИ НА ПАРАМЕТРЫ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В. Л. Шкуратник, Е. А. Новиков

Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",
119049 Москва, Россия
E-mails: v.shkuratnik@misis.ru, e.novikov@misis.ru

Приведены результаты экспериментального исследования акустической эмиссии, возникающей в образцах каменной соли вследствие их локального и объемного нагревания при статическом механическом нагружении, предшествующем нагреванию или происходящем одновременно с ним. Определены параметры термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) в каменной соли в зависимости от ее структурной неоднородности. Установлены закономерности изменения активности ТАЭ в образцах исследуемого геоматериала при их объемном нагревании и последующем остывании в зависимости от величины предварительного механического нагружения. Показана возможность использования выявленных закономерностей для прогнозирования процесса разрушения каменной соли в массиве по результатам измерений ТАЭ в извлеченном из него керне.

Ключевые слова: термостимулированная акустическая эмиссия, каменная соль, эксперимент, структурная неоднородность, напряженно-деформированное состояние, стадии деформирования, прогнозирование разрушения, механическое одноосное нагружение.

Введение. В последнее время активно развивается новое направление исследования структуры, свойств и состояния геоматериалов, основанное на анализе термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) в них. В рамках этого направления разработаны теоретические модели, объясняющие причины возникновения ТАЭ [1, 2], экспериментально установлена ее связь с поврежденностью, прочностью и напряженно-деформированным состоянием образцов скальных горных пород [3–5]. Однако соответствующие исследования пластичных пород ранее практически не проводились, несмотря на то что их важность представляется очевидной. В частности, это обусловлено необходимостью совершенствования методов геоконтроля, используемых при разработке соляных месторождений и строительстве в соляных массивах бесшахтных резервуаров для хранения углеводородов или захоронения токсичных отходов.

Типичным образцом пластичных пород является каменная соль, обладающая сильно выраженными реологическими свойствами и высокой пластичностью, что затрудняет ее исследование с использованием традиционных методов, основанных на измерении деформаций механически нагружаемых образцов. Целью данной работы является установление закономерностей изменения параметров ТАЭ в образцах каменной соли под влиянием возрастающих одноосных напряжений в них.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-05-00168).

© Шкуратник В. Л., Новиков Е. А., 2015

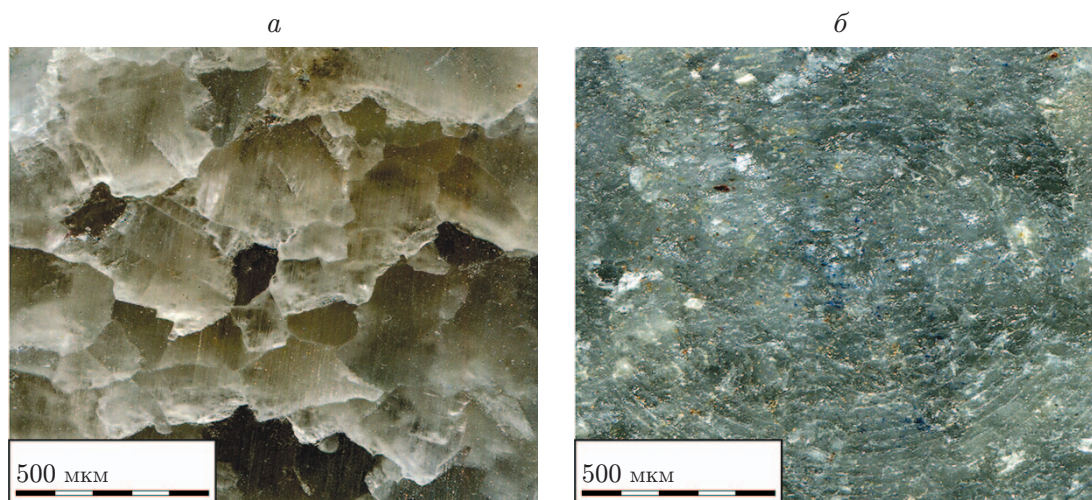


Рис. 1. Торцевая поверхность образцов каменной соли, входящих в первую (а) и вторую (б) группы

1. Характеристика исследуемых образцов и схема проведения экспериментов. Исследовались цилиндрические образцы каменной соли Верхнекамского месторождения, имеющие высоту 70 мм и диаметр 35 мм. Предварительно все образцы были разделены на две группы: 1) образцы с четко выраженной фрагментарной структурой, отдельные элементы которой существенно различаются как размером, так и формой (рис. 1, а); 2) образцы с относительно равномерной мелкозернистой структурой (рис. 1, б).

Для исключения аномальной дефектности в образцах и обеспечения однородности их механических свойств с использованием ультразвуковых сигналов на частоте 600 кГц в каждой группе было отобрано по 35 образцов, в которых относительное отклонение скорости распространения и коэффициента затухания продольных упругих волн от соответствующих средних значений не превышало 2,5 и 5,8 % соответственно.

До начала акустоэмиссионных испытаний по шесть образцов в каждой группе были испытаны на прочность при сжатии по ГОСТ 21153.2-84. Установлено, что для фрагментированных образцов предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ составляет (23 ± 2) МПа, а для образцов с мелкозернистой структурой — (27 ± 3) МПа.

Эксперименты проводились по двум схемам, различающимся режимами возбуждения ТАЭ и способами приложения внешней механической нагрузки. В экспериментах, выполненных по первой схеме (рис. 2), создаваемое прессом заданное статическое давление P передается на образец 1 через плиты 2 и 3. Центральную область образца по его периметру охватывает кольцевой электронагревательный элемент 4, создающий в указанной области температуру, равную 90 °С, и локальные термонапряжения, достаточные для возбуждения сигналов ТАЭ. Эти сигналы, как и сигналы акустической эмиссии (АЭ), возникающие при механическом нагружении образца, принимаются пьезопреобразователями 5 и 6, вмонтированными в плиты пресса. На выходе каждого пьезопреобразователя сигналы АЭ регистрируются и обрабатываются акустико-эмиссионной измерительной системой A-Line 32D. Описанная схема лабораторного эксперимента воспроизводит квазистатический режим механического нагружения каменной соли, который имеет место в массиве при преобладании в нем одноосного напряженно-деформированного состояния. Создание в массиве локальных областей термонапряжений с использованием пробуренных шпуров не вызывает затруднений, что позволяет использовать результаты лабораторных экспериментов для интерпретации данных натурных испытаний, полученных методом ТАЭ.

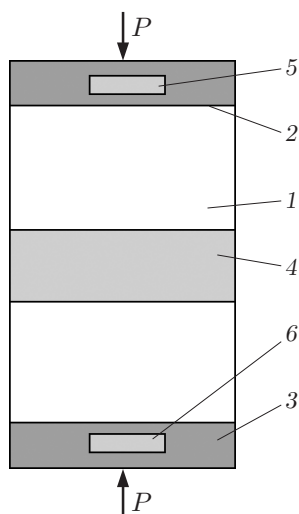


Рис. 2

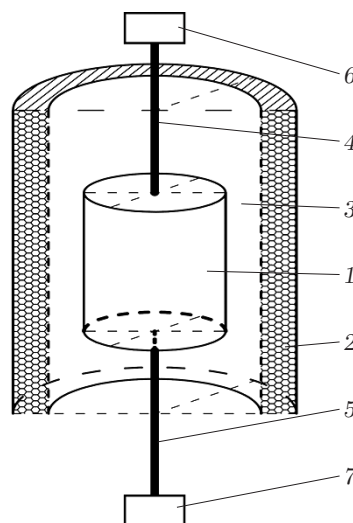


Рис. 3

Рис. 2. Схема локального термического и одноосного механического нагружения образца каменной соли:

1 — образец, 2, 3 — плиты, 4 — нагревательный элемент, 5, 6 — пьезопреобразователи

Рис. 3. Схема объемного термического нагружения образца каменной соли в трубчатой печи:

1 — образец, 2 — нагревательная печь, 3 — нагреваемая полость, 4 — верхний кварцевый волновод, 5 — нижний кварцевый волновод, 6, 7 — пьезопреобразователи

В экспериментах, выполненных по второй схеме (рис. 3), моделируются условия механического нагружения извлеченного из массива керна. Последний в процессе термического воздействия и генерации ТАЭ не испытывает механической нагрузки, но содержит информацию о ее предыстории. В соответствии с указанной схемой предварительно нагруженный (в течение достаточно длительного промежутка времени) до заданного значения давления P образец 1 помещается в трубчатую нагревательную печь 2 типа Nabertherm RT 50/250/11 и закрепляется во внутренней равномерно нагреваемой полости 3 путем сжатия его верхним 4 и нижним 5 кварцевыми волноводами, проходящими через торцевые заглушки печи (на рис. 3 не показаны). Сигналы ТАЭ от образца каменной соли, возникающие в результате интегрального объемного нагрева, передаются через волноводы к закрепленным на их внешних торцевых поверхностях пьезопреобразователям 6 и 7, а затем — на акустико-эмиссионную измерительную систему.

2. Акустическая эмиссия при локальном нагревании образцов каменной соли, подвергаемых одноосному механическому нагружению. Экспериментальные исследования обеих групп образцов каменной соли проводились независимо в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. На каждый образец подавалась и поддерживалась в течение 60 мин одноосная механическая нагрузка $P_i = 0,1\sigma_{сж}n$ (n — порядковый номер образца). Заметим, что при каждом выбранном значении напряжения испытывалось не менее двух образцов с одним и тем же порядковым номером. Полученные результаты затем усреднялись.

После того как возникающая под влиянием указанной нагрузки активность АЭ N_{Σ} уменьшалась до фонового уровня, осуществлялся нагрев области в центральной части образца до температуры $T = 90 \pm 3$ °С. Зависимости активности N_{Σ} и суммарного счета N (число зарегистрированных превышений импульсами АЭ установленного уровня дискри-

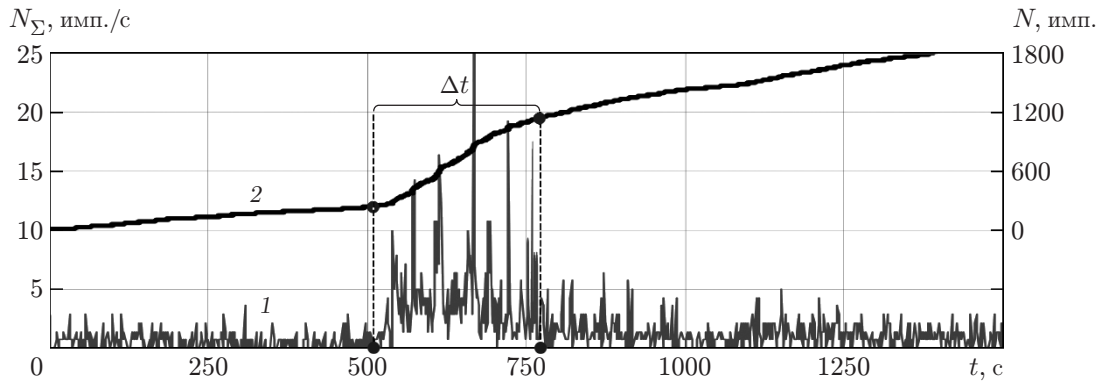


Рис. 4. Характерные экспериментальные зависимости активности N_{Σ} (1) и суммарного счета N (2) АЭ при нагревании в интервале времени Δt образцов каменной соли Верхнекамского месторождения

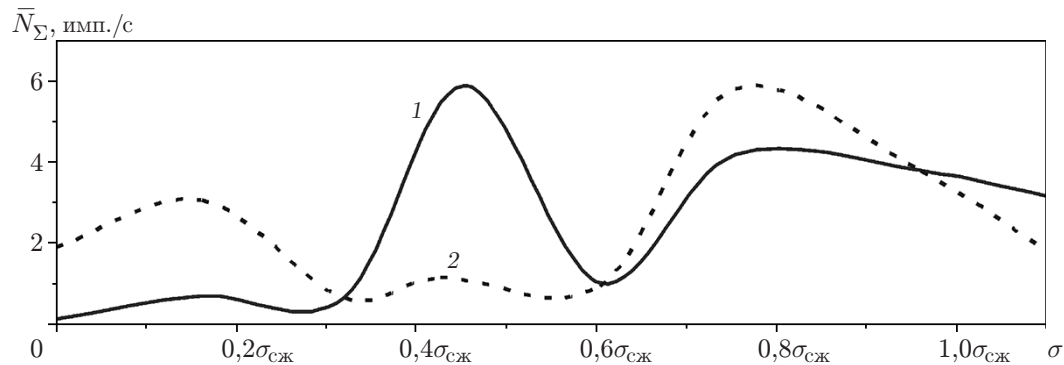


Рис. 5. Зависимости средней активности ТАЭ \bar{N}_{Σ} от нагрузки σ , приложенной к образцам соли первой (1) и второй (2) групп

минации (ограничения) в интервале времени наблюдения) возникающей при этом ТАЭ от времени, регистрируемые измерительной системой, представлены на рис. 4. Для этих зависимостей четко выделяется временной интервал Δt , в котором наблюдаются аномально большие значения N_{Σ} и скорости увеличения величины N . Начало этого интервала соответствует моменту достижения значения температуры образца, при котором в нем возникают термонапряжения, способные вызвать генерацию ТАЭ. Конец интервала соответствует моменту установления температурного равновесия образца с окружающей средой, при котором прекращается изменение его температуры и как следствие генерация сигналов ТАЭ.

Средняя активность ТАЭ \bar{N}_{Σ} в интервале Δt принята в качестве информативного параметра. Значение этого параметра соответствует определенной величине механической нагрузки σ , измеряемой в долях значения $\sigma_{сж}$. Результаты испытаний образцов первой и второй групп с использованием ТАЭ представлены на рис. 5. Видно, что для образцов каждой группы с различной степенью фрагментации соответствующие зависимости имеют одни и те же особенности, заключающиеся в наличии положительных экстремумов \bar{N}_{Σ} при $\sigma \approx 0,18\sigma_{сж}$; $0,46\sigma_{сж}$; $0,77\sigma_{сж}$. По значениям экстремумов на зависимостях, приведенных на рис. 5, можно судить о принадлежности образцов к первой или второй группе.

Характер зависимостей на рис. 5 определяется следующими факторами.

Относительно кратковременный нагрев до температуры, равной 90°C , не способен вызвать в образцах каменной соли существенное дефектообразование. Поэтому разруша-

ются и становятся источниками ТАЭ преимущественно связи, которые были ослаблены (нарушены) при предварительном механическом нагружении.

При механическом нагружении одновременно происходят два процесса: переход структурных связей на стадию, предшествующую АЭ, когда даже относительно малого теплового воздействия достаточно для того, чтобы они стали источниками ТАЭ, и процесс полного разрушения этих связей, в результате которого они уже не могут быть источниками ТАЭ (если потенциальный источник АЭ уже разрушен, то генерация АЭ при нагреве невозможна).

В начале процесса нагружения происходит ослабление структурных связей, в дальнейшем наблюдается их разрушение.

Чем более существенно ослаблена структура образца, тем меньшая механическая нагрузка требуется для разрушения изначально содержащихся в нем дефектов и генерации АЭ.

Таким образом, при механическом нагружении сильно фрагментированных образцов в диапазоне $0 < \sigma < 0,33\sigma_{сж}$ происходит разрушение большинства потенциальных источников АЭ и к моменту начала термического нагружения они практически отсутствуют. В то же время при нагружении образцов с мелкозернистой структурой до значений $0,33\sigma_{сж}$ образуется незначительное количество дефектов, которые в основном становятся источниками АЭ в ходе последующего термического нагружения.

Наличие экстремума при $\sigma \approx 0,18\sigma_{сж}$ объясняется тем, что вплоть до этого значения нагрузки происходит схлопывание имеющихся малых дефектов и затухание сигналов ТАЭ уменьшается. При $0,18\sigma_{сж} < \sigma < 0,33\sigma_{сж}$ под влиянием внешней механической нагрузки исходная дефектность частично восстанавливается за счет раскрытия ранее схлопнувшихся дефектов, при этом новые дефекты практически не образуются. Однако размер раскрывшихся дефектов остается достаточно малым, что не позволяет им стать источниками значительной ТАЭ. Иными словами, на рассматриваемой стадии происходит более интенсивное затухание сигналов ТАЭ без увеличения их количества. В результате средняя величина активности ТАЭ уменьшается.

Сказанное выше справедливо до момента начала дилатансии, когда АЭ определяется разрушением изначально содержащихся в образце ослабленных связей, а интенсивного трещинообразования не происходит.

При превышении определенного значения нагрузки, достаточного для разрушения структурных связей более высокого уровня (начало дилатансии), происходит резкое увеличение активности АЭ. Это явление аналогично известному “эффекту Кайзера” [6], заключающемуся в возникновении существенной АЭ при повторном нагружении только после превышения максимального значения нагрузки в предыдущем цикле нагружения. В данном случае под нагрузкой первого цикла понимается воздействие горного давления в массиве, из которого получен керновый материал, использованный для изготовления испытываемых образцов. Так как состав и происхождение образцов одни и те же, можно предположить, что степень их исходной фрагментации определяется воздействием горного давления.

Из сказанного выше следует, что для сильно фрагментированных образцов при $\sigma \approx 0,33\sigma_{сж}$ значение \bar{N}_{Σ} увеличивается и при $\sigma \approx 0,46\sigma_{сж}$ достигает максимума. Согласно справочным данным (см. [7, 8]) при этой нагрузке в каменной соли происходит интенсивное образование микротрещин, поэтому приложенной механической нагрузки оказывается достаточно для лавинообразного возникновения новых дефектов и развития уже существующих. Очевидно, что количество дефектов в образцах с исходными нарушениями сплошности структуры значительно больше (кривая 1 на рис. 5), чем в образцах, имеющих мелкозернистую структуру (кривая 2 на рис. 5). Таким образом, в первом случае экстре-

мум \bar{N}_Σ имеет значительно большую амплитуду, так как ее значение пропорционально числу всех развивающихся дефектов, а не только вновь образующихся.

Уменьшение значения \bar{N}_Σ в интервале $0,46\sigma_{сж} \leq \sigma \leq 0,60\sigma_{сж}$ объясняется увеличением доли дефектов, раскрывающихся при механическом нагружении, и соответственно уменьшением количества потенциальных источников ТАЭ при возрастающем затухании сигналов АЭ вследствие рассеяния и диссипации упругой энергии.

При $\sigma \geq 0,60\sigma_{сж}$ начинает формироваться сеть макротрещин, характеризующаяся большим числом высокоамплитудных событий АЭ, нивелирующих эффект затухания и обеспечивающих увеличение \bar{N}_Σ вплоть до момента образования фрагментов геоматериала.

При $\sigma \approx 0,77\sigma_{сж}$ испытанные образцы соли первой и второй групп переходят на стадию предразрушения, что приводит к уменьшению \bar{N}_Σ , обусловленному значительным увеличением интенсивности сигналов ТАЭ при объединении трещин в сеть.

Для образцов первой группы коэффициент затухания акустических сигналов больше, чем для образцов второй группы. Чтобы получить одну и ту же степень увеличения коэффициента затухания для образцов обеих групп, необходимо обеспечить более существенное увеличение количества дефектов, т. е. приложить бóльшую нагрузку.

Следует отметить, что по расположению максимумов \bar{N}_Σ на кривых зависимостей, представленных на рис. 5, можно определить стадии деформирования образцов каменной соли. Границы стадий деформирования, определенные методом ТАЭ и с использованием результатов измерений деформации механически нагружаемых образцов [9], хорошо согласуются (см. таблицу).

3. Акустическая эмиссия при объемном нагревании и остывании образцов каменной соли, предварительно подвергнутых одноосному механическому нагружению. Образцы, входящие во вторую группу, т. е. имеющие относительно однородную мелкозернистую структуру, подвергались возрастающему от образца к образцу одноосному механическому нагружению с шагом $0,1\sigma_{сж}$. При этом каждый из образцов выдерживался под соответствующей нагрузкой, составляющей $0,1\sigma_{сж}n$, в течение 24 ч. После снятия нагрузки образец подвергался объемному нагреванию до температуры $T = 600^\circ\text{C}$ со скоростью $2,5^\circ\text{C}/\text{мин}$ в соответствии со схемой, представленной на рис. 3. При достижении указанной температуры нагревание трубчатой печи прекращалось, ее внутренняя полость с находящимся в ней образцом охлаждалась естественным путем. Сигналы ТАЭ, возникающей в образце на этапах нагревания и остывания, через волноводы принимались пьезоэлектрическими приемниками и далее регистрировались и преобразовывались измерительной системой.

На первом этапе обработки результатов измерений определялась осредненная в диапазоне от 300 до 400°C активность ТАЭ \bar{N}_Σ для каждого исследуемого образца на стадии его нагревания. По результатам экспериментов была построена зависимость $\bar{N}_\Sigma = F(\sigma)$, представленная на рис. 6.

Характер зависимости, показанной на рис. 6, определяется следующими факторами. В исходном состоянии все образцы второй группы содержат приблизительно одинаковое количество структурных связей, способных под действием механической нагрузки разрушаться и становиться источниками АЭ. Очевидно, что при переходе к каждому следующему образцу с увеличением указанной нагрузки число таких связей возрастает, соответственно уменьшается число структурных связей, которые могут стать источниками ТАЭ под влиянием термонапряжений в образцах при температуре более 300°C . Этим можно объяснить монотонное уменьшение величины \bar{N}_Σ в интервале $0 < \sigma \leq 0,6\sigma_{сж}$.

При нагрузках, превышающих $0,6\sigma_{сж}$, согласно данным таблицы микроструктурные нарушения в каменной соли становятся настолько большими, что приводят к макрона-

Характеристики стадий деформирования и их границы при одноосном сжатии образцов каменной соли

Стадия деформирования	Границы стадий, определенные методом ТАЭ	Границы стадий, определенные традиционным методом	Характер объемной деформации	Характеристика процессов в образце
Начальная	$(0 \div 0,18)\sigma_{сж}$	$(0 \div 0,20)\sigma_{сж}$	Резкое уплотнение, закрытие пор и трещин	Локальные разрушения вследствие несовершенства поверхности образца
Линейно-упругая	$(0,18 \div 0,46)\sigma_{сж}$	$(0,20 \div 0,40)\sigma_{сж}$	Постепенное уплотнение пор и трещин	Упругое деформирование без существенного изменения формы
Упруго-пластическая	$(0,46 \div 0,77)\sigma_{сж}$	$(0,40 \div 0,70)\sigma_{сж}$	Дальнейшее уплотнение пор и трещин до максимальных значений объемной деформации	Упругопластическое деформирование, появление макротрещин при $\sigma \approx 0,6\sigma_{сж}$
Пластическая предельная	$>0,77\sigma_{сж}$	$(0,70 \div 1,00)\sigma_{сж}$	Уменьшение объемной деформации, разуплотнение	Преимущественно пластическое деформирование, существенное увеличение количества микротрещин

рушению структуры. Количество макронарушений структуры оказывается достаточным для образования микротрещин и трещин, температурного воздействия на которые достаточно для возникновения лавинообразной термодеструкции, сопровождающейся значительным увеличением \bar{N}_{Σ} .

При $\sigma > 0,9\sigma_{сж}$ происходит переход от стадии предразрушения к стадии разрушения, характеризующейся резким уменьшением несущей способности геоматериала, его фрагментацией и как следствие значительным увеличением интенсивности сигналов ТАЭ. В результате приемных преобразователей достигают только сигналы ТАЭ, имеющие большую амплитуду или генерируемые в непосредственной близости от торцевых поверхностей образца, поэтому значение \bar{N}_{Σ} резко уменьшается.

Следует отметить, что результаты, представленные на рис. 6, качественно согласуются с результатами аналогичных исследований [10], проведенных для образцов белого мрамора Кибик-Кордонского месторождения ($\sigma_{сж} \approx 80$ МПа). Это позволяет сделать вывод об универсальности зависимости $\bar{N}_{\Sigma}(\sigma_{сж})$ для горных пород различного происхождения.

Как отмечено выше, экспериментальные исследования ТАЭ в соответствии со схемой, представленной на рис. 3, проводились в режимах не только нагревания образцов каменной

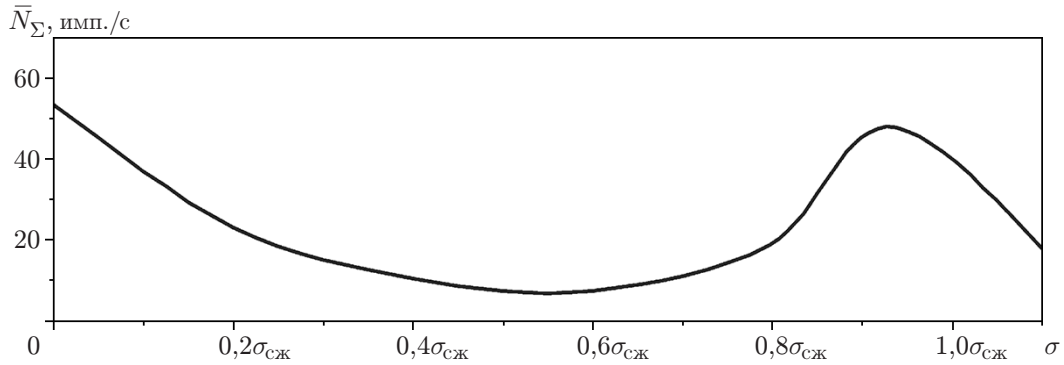


Рис. 6. Зависимость средней активности АЭ \bar{N}_Σ при объемном нагревании образцов каменной соли от величины предшествующей нагреванию одноосной механической нагрузки

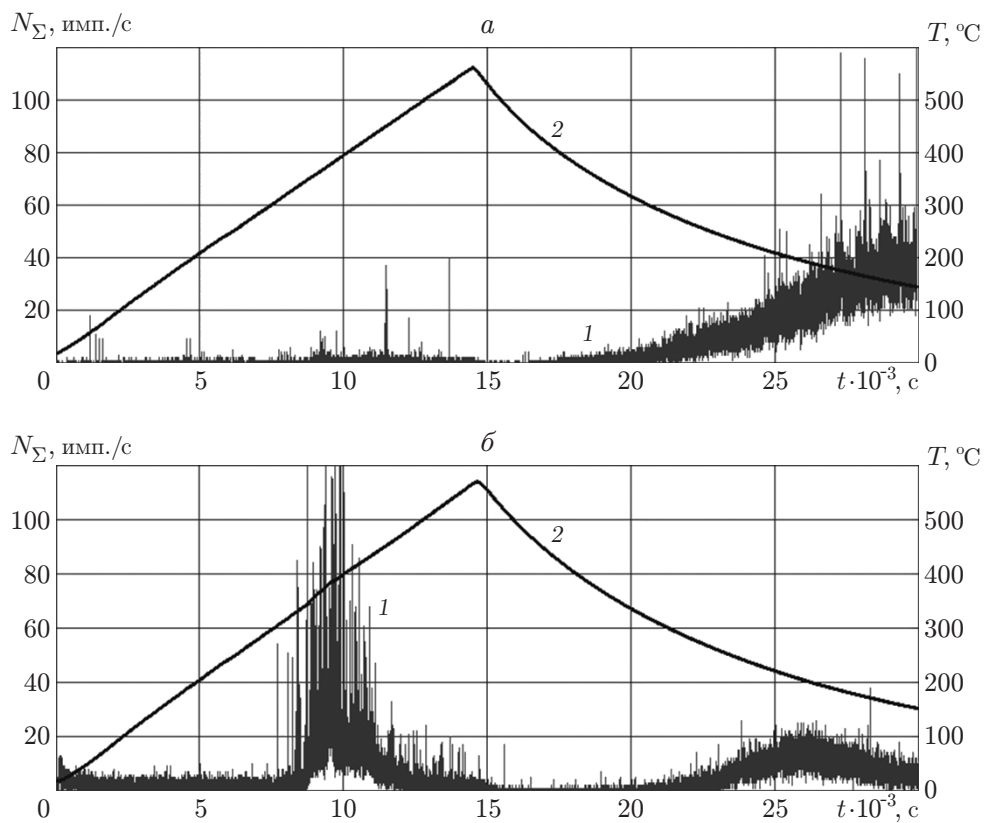


Рис. 7. Зависимости активности АЭ N_Σ (1) и температуры нагрева T (2) от времени при объемном нагревании и последующем остывании образцов каменной соли, предварительно подвергнутых нагружению в различных интервалах: а — $0,9\sigma_{сж} < \sigma < 0,95\sigma_{сж}$, б — $0 < \sigma < 0,9\sigma_{сж}$

соли, но и их остывания. При этом в качестве информативного параметра использовалась активность АЭ N_{Σ} . В результате обнаружено неизвестное ранее явление, заключающееся в принципиально различном характере ТАЭ при нагреве и остывании образцов каменной соли, предварительно подвергнутых нагружению до значений более $0,9\sigma_{сж}$ (рис. 7,а) и менее $0,9\sigma_{сж}$ (рис. 7,б).

У образцов, находящихся на стадиях предразрушения и разрушения ($\sigma \geq 0,90\sigma_{сж}$), значение N_{Σ} при остывании существенно больше, чем при нагреве. Для всех образцов каменной соли, предварительно подвергнутых механическому нагружению до значений менее $0,90\sigma_{сж}$, значение N_{Σ} существенно меньше, чем при нагреве.

Заключение. В работе исследовано влияние механического нагружения образцов каменной соли на параметры ее термостимулированной акустической эмиссии. Показано, что, проводя сравнение активности ТАЭ каменной соли при ее нагреве и остывании, можно прогнозировать разрушение геоматериала непосредственно в массиве, используя для этого полученные из керна образцы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Винников В. А., Шкуратник В. Л.** О теоретической модели термоэмиссионного эффекта памяти в горных породах // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 2. С. 172–177.
2. **Винников В. А., Вознесенский А. С., Устинов К. Б., Шкуратник В. Л.** Теоретические модели акустической эмиссии в горных породах при различных режимах их нагревания // ПМТФ. 2010. Т. 51, № 1. С. 100–105.
3. **Шкуратник В. Л., Новиков Е. А.** Диагностика структурных нарушений образцов скальных горных пород по параметрам термостимулированной в них акустической эмиссии // Материалы 13-й Междунар. конф. “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле”, Москва, 7–9 окт. 2012 г. М.: Информ.-издат. центр Ин-та физики Земли РАН, 2012. С. 291–294.
4. **Shkuratnik V. L., Novikov E. A.** Correlation of thermally induced acoustic emission and ultimate compression strength in hard rocks // J. Mining Sci. 2012. V. 48, iss. 4. P. 629–635.
5. **Шкуратник В. Л., Новиков Е. А.** О взаимосвязи термостимулированной акустической эмиссии с напряженно-деформированным состоянием геоматериала и переходом его в стадию предразрушения // Тр. 20-й Всерос. конф. с участием иностр. ученых “Геодинамика и напряженное состояние недр Земли”, Новосибирск, 7–11 окт. 2013 г. Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2013. С. 32–37.
6. **Lavrov A.** Theoretical investigation of the Kaiser effect manifestation in rocks after true triaxial pre-loading // Arch. Mining Sci. 2001. V. 46, N 1. P. 47–65.
7. **Проскуряков Н. М.** Физико-механические свойства соляных пород / Н. М. Проскуряков, Р. С. Пермяков, А. К. Черников. Л.: Недра. Ленингр. отд-ние, 1973.
8. **Пермяков Р. С., Соломинцев Г. Г., Гаркушин П. К.** Исследование физико-механических свойств, процесса деформирования и разрушения соляных пород // Тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та галургии. 1974. Вып. 67. С. 108–119.
9. **СП 34-106-98.** Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. Введ. 01.03.99. М.: Центр проектной продукции массового применения, 2000; Информ.-реклам. центр газ. пром-сти, 1999.
10. **Шкуратник В. Л., Новиков Е. А.** О влиянии предварительного механического нагружения образцов горных пород на характер проявления в них термоакустической эмиссии // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. Донецьк: УкрНДМІ НАН України, 2011. № 9, ч. 1. С. 405–415.