

УДК 622: 550.372

**В.А. Винников, В.Л. Шкуратник**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХОВЫХ  
ФАКТОРОВ НА ТЕРМОЭМИССИОННЫЙ  
ЭФФЕКТ ПАМЯТИ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ \***

Эффекты памяти представляют собой проявления способности горных пород накапливать, хранить и при определенных условиях воспроизводить информацию об испытанных ранее природно-генетических или техногенных воздействиях. В настоящее время известен целый ряд эффектов памяти о механических, тепловых, электрических и магнитных воздействиях на горные породы, различающихся как характером запоминаемых величин (векторных или скалярных), так и типом откликов.

Термоэмиссионный эффект памяти заключается в невозможности активности акустической эмиссии при циклическом нагревании горных пород вплоть до максимальной температуры предшествующего цикла, при достижении которой указанная активность скачкообразно возрастает. В сравнении с механическими, магнитными или электрическими эффектами памяти, термоэмиссионный эффект памяти относится к наименее изученным в теоретическом плане [1]. Одна из возможных теоретических моделей, объясняющая механизм формирования этого эффекта, была обоснована авторами в [2]. При нагревании горных пород вследствие неоднородности и анизотропии теп-

ловых свойств в отдельных минеральных зернах породы возникают внутренние термонапряжения. При превышении этими термонапряжениями некоторого критического значения начинается устойчивый рост трещин, а, следовательно, и активности акустической эмиссии. Действующее значение таких напряжений определяется не только физическими свойствами отдельных структурных элементов породы, но и величиной испытанных ранее термонапряжений, что и объясняет термоэмиссионный эффект памяти.

Таким образом, в указанной модели термоэмиссионная память, как и память об испытанных ранее механических напряжениях, возникает благодаря развитию разномасштабных дефектов структуры горных пород. Следует отметить, что роль дефектности в формировании и проявлении эффектов памяти противоречива. С одной стороны, если бы у горной породы дефекты отсутствовали, то и эффекты памяти в такой породе не возникали. Однако излишне большое количество дефектов неминуемо приведет к ухудшению четкости эффектов памяти [3].

Известно, что дефектность горных пород меняется не только под воздействием ранее испытанных термических напряжений, но и изменяется

---

\*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 0705-000-45.

как с течением времени, так и под воздействием факторов различной физической природы (в частности, увлажнения). Эти воздействия можно отнести к помеховым с точки зрения термоэмиссионного эффекта памяти, так как они приводят к искажению и даже полному исчезновению последнего.

Изучение термоэмиссионного эффекта памяти началось более тридцати лет назад, однако в настоящее время проведено лишь небольшое число исследований, направленных на исследование влияния помеховых факторов на информацию, которую несут в себе эффекты памяти. Одно из последних исследований в этой области, проведенное впервые на образцах антрацита и коксового угля, позволило установить, что увлажнение образцов приводит, с одной стороны, к повышению активности акустической эмиссии, а с другой – к «стиранию» термоэмиссионной памяти [4]. Как отмечено в обзорной части статьи [4], подобные же закономерности характерны и для других типов пород.

В настоящей работе проведена адаптация модели, описанной в [2], к учету влияния воздействия воды на горные породы, и приведены результаты компьютерного моделирования термоэмиссионного эффекта памяти при помеховом воздействии влажности.

Воздействие воды на горные породы вообще, и на те их свойства, которые ответственны за возникновение термоэмиссионного эффекта памяти, в частности, является весьма сложным, поскольку вода может как заполнять поры и трещины горной породы, так и изменять структуру самой породы и, соответственно ее механические и теплофизические свойства

С одной стороны, пленочная вода, количество которой увеличивается с ростом пористости и дисперсности пород, благодаря силам поверхностного натяжения, улучшает тепловой

контакт между структурными элементами, слагающими горную породу, что облегчает переход тепла от одной частицы к другой с помощью теплопроводности (теплопроводность воды на порядок выше теплопроводности воздуха или природного газа). Кроме того, в результате глубинного теплового потока возникает градиент температуры, который возбуждает процессы термодиффузии и конвекции. Следовательно, при насыщении породы водой должны увеличиваться ее теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность.

С другой стороны, наличие воды меняет и механические свойства породы. Так, в случае активного воздействия воды на слагающие породу минералы (за счет их растворения, вымывания частичек, размягчения) или при наличии свободных путей движения воды в породе должны уменьшаться упругие параметры пород (модули Юнга и сдвига). Однако при отсутствии свободных путей движения воды в породе и возникновении в порах породы заземленной воды, препятствующей ее деформации, упругие параметры породы растут.

Все эти явления очень сложно учесть при моделировании термоэмиссионного эффекта памяти в условиях воздействия воды. Однако если предположить, что вода в трещинах породы отсутствует, а происходит лишь увлажнение самой породы, меняющее ее термофизические и прочностные свойства, то задача существенно упростится.

Термофизические свойства, существенные для термоакустического эффекта памяти, ответственны в основном за скорость передачи тепла, и в модели, где не учитываются временные параметры, незначимы. А изменение упругих свойств (модуля Юнга  $E$ ) при увлажнении породы можно аппроксимировать зависимостью вида  $E = E_0 e^{-\omega}$ , где  $E_0$  –

модуль Юнга сухой породы, а влажность  $\omega$  задается в процентах.

Описание модели, которая взята за основу в настоящей работе, приведено в [2]. Эта модель базируется на следующих принципах.

Предположим, что рассматриваемый объем горной породы представлен совокупностью структурных элементов, обладающих разными тепловыми свойствами (в частности, разными величинами коэффициентов теплопроводности). В качестве структурных элементов могут выступать, например, минеральные зерна, их агрегаты или составные части агрегатов. Пусть на границах между этими структурными элементами расположены микротрещины, имеющие характерный размер  $2L$ , а весь рассматриваемый объем подвергается мгновенному нагреву по границам до заданной температуры. Подведенная таким образом тепловая энергия в дальнейшем распределяется между структурными элементами в соответствии с их тепловыми свойствами.

Будем считать, что раскрытие трещин весьма мало, и наличие воздушной (или иной) прослойки в трещинах существенно не искажает тепловое поле в рассматриваемом объеме горной породы. Кроме того, предположим, что ни до, ни после температурного воздействия берега трещин не могут сомкнуться, и в силу этого при росте трещин трение по этим берегам отсутствует. Естественно предположить, что большее влияние на тепловое поле окажут сами границы структурных элементов, чем расположенные вдоль них микротрещины.

При таком подходе нагрев образца может моделироваться изменением температуры, до которой осуществляется мгновенный нагрев по границам, а временные факторы (темп роста температуры, время выдержки между циклами) в данной модели учитываются не будут.

Каждый из обусловленных нагревом актов зарождения или роста трещин

сопровождается единичным актом акустической эмиссии. При этом рост трещин в соответствии с представлениями механики разрушения происходит при условии превышения коэффициентом интенсивности напряжений  $K$  критического значения  $K_c$ .

Пусть однородный тепловой поток постоянной интенсивности  $q$  действует на квазиоднородную изотропную среду, в которой перпендикулярно направлению этого потока расположена трещина  $2L$  с раскрытием  $s$ . С учетом полученного в [5] для этого случая решения задачи термоупругости можно записать следующие выражения коэффициентов интенсивности напряжения вблизи вершины трещины, соответственно первого, третьего и второго типов:

$$K_I(\pm L) = K_{III}(\pm L) = 0 ;$$

$$K_{II}(\pm L) = \mp \frac{\alpha E \sqrt{\pi}}{4(1-\nu)\lambda} q L^{3/2}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного теплового расширения,  $1/K$ ;  $E$  – модуль Юнга, Па;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Поскольку  $q/\lambda = \Delta t/s$ , где  $\Delta t$  – перепад температур на берегах трещины, то второе из соотношений (1) может быть записано в виде:

$$K_I(\pm L) = K_{III}(\pm L) = 0 ;$$

$$K_{II}(\pm L) = \mp \frac{\alpha E \sqrt{\pi}}{4(1-\nu)s} \Delta t L^{3/2}. \quad (2)$$

В плоской постановке задачи рост трещины под воздействием температурного поля будет происходить, если определенный выражением (2) коэффициент интенсивности напряжений второго типа превышает критическое значение  $K_c$  коэффициента интенсивности напряжений

$$K_{II}(\pm L) \geq K_c. \quad (3)$$

При росте трещины, обусловленном воздействием температурных полей, вблизи ее вершины происходит

перераспределение механических напряжений, приводящее к уменьшению коэффициента интенсивности напряжений, и при достижении характерным размером трещины некоторого критического значения ее рост остановится. Следующая ступень температурного нагрева приведет к очередному росту и очередному акту акустической эмиссии, и т.д.

Учитывая, что в подвергнутом нагреву объеме горной породы исходные микротрещины могут иметь различную длину, процесс их роста происходит не лавинообразно, а с некоторым «размытием» по температурной шкале.

Численное моделирование термоэмиссионного эффекта памяти на основе описанной выше модели предполагает предварительное определение величины перепада температур на берегах трещины  $\Delta t$ . Очевидно, что эта задача может быть решена только с учетом конкретного строения самой горной породы. Рассмотрим определение величины  $\Delta t$  в случае, когда горная порода представлена структурными элементами одинакового состава, но с разными тепловыми свойствами (например, порода представляет собой поликристаллический агрегат с различным образом ориентированными зернами).

Задачу о нахождении стационарного теплового поля в неоднородной бесконечной поликристаллической среде будем рассматривать при условии заданной на бесконечности скорости роста температуры. Саму же указанную среду будем считать состоящей из совокупности конечных областей с различными тепловыми свойствами.

Эта задача была решена в работе [2], и искомая разность градиентов температур, возникающая на границе включения и среды, будет равна:

$$\begin{aligned} (\text{grad } T^0)_\alpha - (\text{grad } T)_\alpha &= \\ &= \left( I + A \left( \Lambda_{\alpha\beta}^1(x_n) - \Lambda_{\alpha\beta}^0(x_n) \right) \right)^{-1} T, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $I$  – единичный двухвалентный тензор,  $\Lambda_{\alpha\beta}^0(x_n)$  – тензор коэффициентов теплопроводности среды,  $\Lambda_{\alpha\beta}^1(x_n)$  – тензор коэффициентов теплопроводности включения конечных размеров, на границе которого со средой расположена рассматриваемая микротрещина. Множитель  $A$  задается выражением

$$A = A_{\alpha\beta}^0 = \frac{1}{\xi} \int_V K_{\alpha\beta}^*(u; k) dV, \quad (5)$$

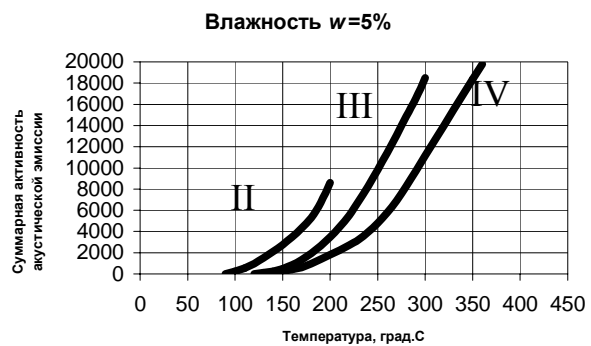
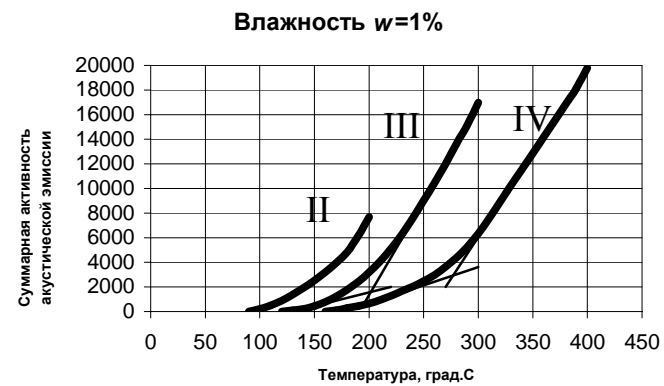
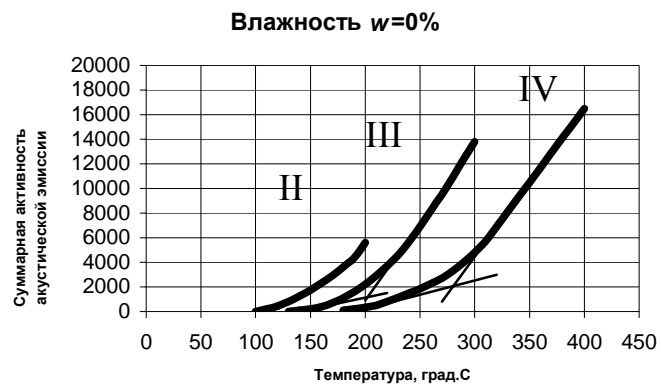
где  $\xi$  – нормирующий множитель, величина которого зависит от размерности задачи;  $V$  – единичная площадь или объем включения, по которой (или по которому) производится интегрирование,

$$K_{\alpha\beta}^*(u; k) = \left( k_\lambda \Lambda_{\lambda\mu} k_\mu \right)^{-1} \cdot k_\lambda k_\mu.$$

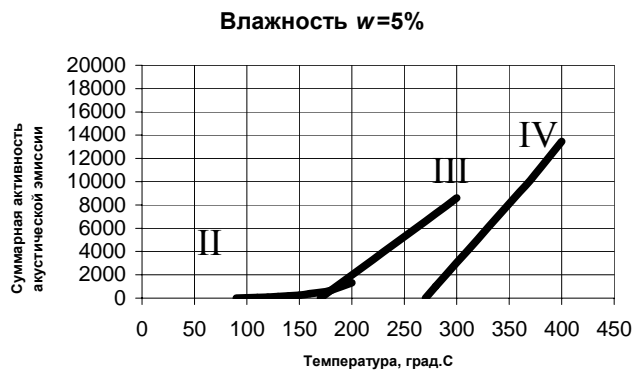
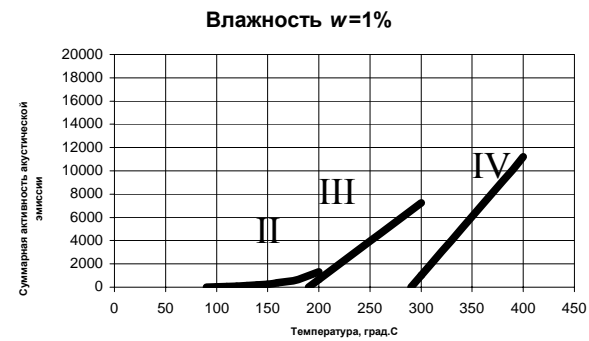
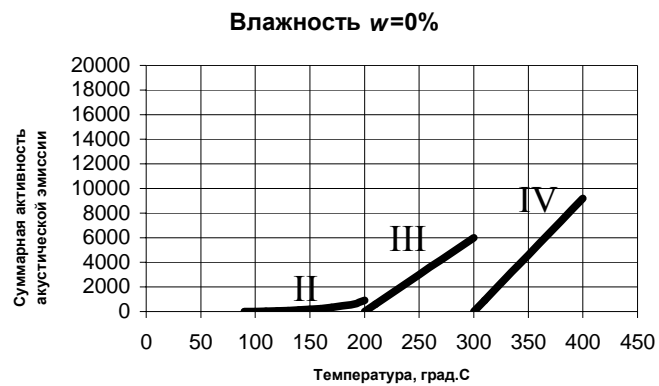
Все вышеприведенные выкладки положены в основу модели, структура которой и компьютерная реализация подробно описаны в [6]. Модель реализована для кварца, тензор теплопроводности которого известен [7]. При этом проводилось компьютерное моделирование четырех циклов нагрева: 1 цикл (подготовительный) – от 0 до 100 °С, 2 цикл – от 0 до 200 °С; 3 цикл – от 0 до 300 °С; 4 цикл – от 0 до 400 °С. На рисунках цифрами обозначены номера циклов нагрева (первый цикл не показан ввиду малости значений суммарной акустической эмиссии в нем).

Влияние влажности учитывалось изменением величины модуля Юнга согласно вышеприведенному закону. Расчет велся при влажности 0 %, 1 % и 5 %. Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 1-3.

На рис. 1 приведены результаты моделирования влияния влажности на термоэмиссионный эффект памяти в квазиоднородной среде (однородная, или массивная, структура),



**Рис. 1. Результаты моделирования влияния влажности на термоэмиссионный эффект памяти в квазигомогенной среде**



**Рис. 2. Результаты моделирования влияния влажности на термоэмиссионный эффект памяти в среде со слоистой структурой**

при моделировании которой у всех структурных элементов тензор теплопроводности строится путем поворота на случайным образом задаваемый угол тензора, приведенного к главным осям.

Из этого рисунка видно, что при влажности  $w = 1\%$  суммарная активность акустической эмиссии в каждом цикле нагрева выше, чем для влажности  $w = 0\%$ . При  $w = 0\%$  термоакустический эффект памяти четко проявляется во втором цикле нагрева, и менее четко в третьем и четвертом циклах. При влажности  $w = 5\%$  рост уровня активности АЭ наблюдается уже при температурах, существенно меньших максимальной температуры второго цикла нагрева.

На рис. 2 приведены результаты моделирования влияния влажности на термоэмиссионный эффект памяти в среде со слоистой структурой, которая реализуется, если зафиксировать

углы поворота главных осей тензора теплопроводности у расположенных в ряд зерен (при толщине ряда в 1 зерно), и чередовать эти углы поворота от ряда к ряду. Из этого рисунка видно, что при влажности  $w = 0\%$  термоэмиссионный эффект памяти проявлялся достаточно четко. При влажности  $w = 1\%$  четкость проявления этого эффекта уменьшается (активность акустической эмиссии возрастает немного ранее температуры окончания предыдущего цикла нагрева). При этом наблюдается возрастание абсолютной величины суммарной акустической эмиссии. При влажности  $w = 5\%$  термоэмиссионный эффект памяти явно проявляется только во втором цикле нагрева.

Таким образом, результаты моделирования в целом качественно совпадают с экспериментальными данными, полученными в [4].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. – М.: Изд. МГТУ, 2004.

2. Винников В.А., Шкуратник В.Л. О теоретической модели термоэмиссионного эффекта памяти в горных породах. // ПМТФ. – 2008. – Т. 49, № 2, с. 172-177.

3. Шкуратник В.Л., Лавров А.В. Эффекты памяти в горных породах. Физические закономерности, теоретические модели. – М.: Изд. Академии горных наук, 1997.

4. Кучурин С.В., Шкуратник В.Л., Винников В.А. Закономерности влияния поме-

ховых факторов на термоэмиссионный эффект памяти в образцах угля. // ФТПРПИ. – 2008. – № 2, с. 21-28.

5. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения. – М.: Наука, 1975, с. 359–361.

6. Винников В.А., Кириченко И.В., Шкуратник В.Л. Моделирование термоэмиссионных эффектов памяти в неоднородных горных породах. // ГИАБ. – 2008. – № 5, с. 81-88.

7. Най Дж. Физические свойства кристаллов. – М.: ИЛ, 1960, с. 236-237. **ГИАБ**

#### Коротко об авторах

Винников В.А. – кандидат технических наук, доцент кафедры Физики горных пород и процессов,

Шкуратник В.Л. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Физико-технического контроля процессов горного производства,

Московский государственный горный университет.

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.С. Вознесенский.