

УДК 622.831:542:34

А.В. Корчак, В.Л. Шкуратник

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрены физические предпосылки, методическое и аппаратное обеспечение экспериментального определения коэффициента Пуассона горных пород на основе особенностей проявления в них эффекта Кайзера.

Ключевые слова: коэффициент Пуассона, горные породы, эффект Кайзера, акустическая эмиссия.

**A.V. Korchak, V.L. Shkuratnik
ON THE POSSIBILITY OF THE KAISER
EFFECT USE FOR THE ROCK
POISSON'S RATIO DETERMINATION**

The physical backgrounds, methodical and hardware facilities for experimental Poisson ratio defining for the rocks on the base of the peculiarities of the Kaiser effect developing are reviewed.

Key words: Physical suppositions, methodical and apparatuses of the rock Poisson's ratio experimental determination on the base of Kaiser effect are discussed.

Акустоэмиссионный эффект памяти (эффект Кайзера) наблюдается при циклическом нагружении горных пород с возрастающей от цикла к циклу амплитудой нагружения. Эффект заключается в невозможности акустической эмиссии (АЭ) вплоть до максимального напряжения предшествующего цикла σ_m , когда параметры АЭ скачкообразно восстанавливаются до уровня, соответствующего этому максимальному напряжению. В качестве таких параметров могут выступать активность, интенсивность или b -параметр эмиссии [1].

Проведенными к настоящему времени исследованиями показано, что

эффект Кайзера проявляется в горных породах всех генетических типов и может быть успешно использован для измерения напряжений в земной коре, оценки степени нарушенности геосреды (например, под влиянием факторов выветривания), а также выступать в качестве эффективного инструмента в познании фундаментальных закономерностей поведения геоматериалов в процессе их деформирования и разрушения. В то же время попытки использования указанного эффекта для оценки упругих свойств горных пород до настоящего времени не предпринимались. В связи с этим в настоящей работе предлагается физическое обоснование и рассматриваются алгоритм и аппаратное обеспечение измерения коэффициента Пуассона горных пород, которые в отличие от традиционных подходов, не предполагают проведение сложных тензометрических деформационных измерений на образцах в процессе их нагружения [2]. Тем более, что тензометрические измерения носят локальный характер и сильно зависят от качества поверхности в точках установки тензодатчиков, а получаемые с их помощью зависимости между на-

пряжениями и деформациями принципиально нелинейны. В то же время сигналы АЭ несут информацию обо всём объёме исследуемого образца. Кроме того, достаточно просто решается проблема обеспечения надёжных контактных условий приёмных преобразователей АЭ с образцом.

Для реализации предлагаемого способа определения коэффициента Пуассона соответствующие измерения осуществляют на двух образцах, полученных из одного керна геоматериала. Сначала проводят двухцикловое одноосное нагружение первого образца, в процессе которого измеряют активность акустической эмиссии. Двухцикловому нагружению подвергают также второй образец. При этом первый цикл нагружения первого образца осуществляют в режиме запрещенных боковых деформаций, а второго – по схеме Кармана в режиме трехосного осесимметричного сжатия. Второй образец во втором цикле нагружают одноосно, причем, в качестве откликов образцов в процессе второго цикла их нагружения измеряют активность АЭ (ААЭ), определяют величины осевых напряжений, соответствующих максимуму активности акустической эмиссии каждого из образцов и определяют коэффициент Пуассона по формуле

$$v = \frac{(\sigma_{11}^I - \sigma_{11}^{II})\sigma_{22}^I}{(\sigma_{12}^I + \sigma_{22}^I - \sigma_{12}^{II})\sigma_{11}^I - \sigma_{11}^{II} \cdot \sigma_{22}^I}, \quad (1)$$

где σ_{11}^I – максимальное значение осевого напряжения первого образца в первом цикле его нагружения; σ_{12}^I – максимальное значение осевого напряжения второго образца в первом цикле его нагружения; σ_{22}^I – максимальное значение бокового напряжения второго образца в первом цикле его нагружения; σ_{11}^{II} – значение осе-

вого напряжения, при котором активность акустической эмиссии во втором цикле нагружения первого образца достигает максимума; σ_{12}^{II} – значение осевого напряжения, при котором активность акустической эмиссии во втором цикле нагружения второго образца достигает своего максимума. Таким образом, в формуле (2) верхний индекс при σ обозначает номер цикла нагружения (первого – I, или второго – II); первый нижний индекс при σ обозначает режим нагружения (осевое – 1, или боковое – 2); второй нижний индекс обозначает номер образца (первого – 1 или второго – 2) [3].

Физические предпосылки способа заключаются в использовании особенностей проявления акустоэмиссионного эффекта памяти образцов горных пород при их двухцикловом нагружении и различных режимах указанного нагружения в первом (I) и втором (II) циклах. Так, экспериментальные и теоретические исследования показывают [1], что если первый образец в I цикле нагрузить по схеме Кармана, то есть в режиме трехосного осесимметричного сжатия ($\sigma_{11}^I > \sigma_{21}^I = \sigma_{31}^I$), а во II цикле в режиме одноосного сжатия ($\sigma_{11}^{II} > \sigma_{21}^{II} = \sigma_{31}^{II} = 0$), то АЭ эффект памяти, во-первых, проявляет себя в виде максимума кривой «активность акустической эмиссии – напряжение», а во-вторых, имеет место при достижении осевым напряжением второго цикла значения

$$\sigma_{11}^{II} = (\sigma_{11}^I - \sigma_{21}^I) - k\sigma_{21}^I, \quad (2)$$

где k – безразмерный коэффициент, зависящий от коэффициента μ трения между берегами трещин в образце,

$$k = \frac{2\mu}{(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu} \quad (3)$$

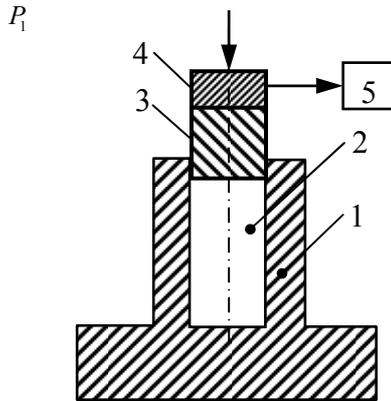


Рис. 1. Схема испытательной установки с жесткой кольцевой обоймой

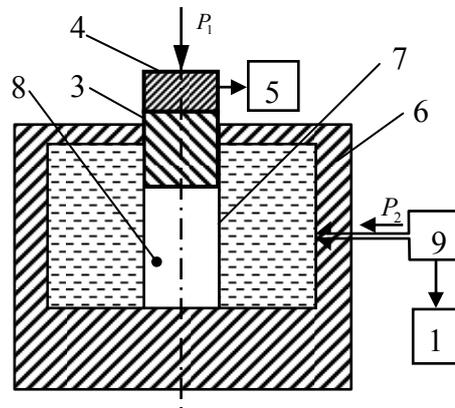


Рис. 2. Схема испытательной установки с иммерсионной камерой

При одноосном нагружении первого образца в I цикле в режиме запрещенного развития боковых деформаций

$$\varepsilon_{21,31}(\sigma'_{11} > 0, \varepsilon'_{11} > 0, \varepsilon'_{21} = \varepsilon'_{31} = 0)$$

$$\sigma'_{21} = \sigma'_{31} = \lambda \sigma'_{11} = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma'_{11}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент бокового отпора; ν – коэффициент Пуассона.

При нагружении первого образца во II цикле в режиме одноосного сжатия с одновременной регистрацией активности АЭ, соответствующий эффект памяти наступает при напряжении, описываемом выражением (3), то есть, с учетом (4) при напряжении

$$\sigma''_{11} = \sigma'_{11} - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma'_{11} - \frac{\nu}{1-\nu} k \cdot \sigma'_{11}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что искомым коэффициент Пуассона

$$\nu = \frac{\sigma'_{11} - \sigma''_{11}}{(k+2)\sigma'_{11} - \sigma''_{11}} \quad (6)$$

Величина коэффициента k для данной горной породы также может быть определена на основе акустоэмиссионного эффекта памяти в независимом эксперименте, проведенном на втором образце, полученном

из того же керна, что и первый образец [1].

Для этого в первом (I) цикле второй образец нагружают по схеме Кармана в режиме разрешенных боковых деформаций, когда $\sigma'_{12} > \sigma'_{22} = \sigma'_{32} > 0$, $\varepsilon'_{12} > \varepsilon'_{22} = \varepsilon'_{32} > 0$. При этом во втором цикле одноосного сжатия акустоэмиссионный эффект памяти наступит при достижении значения напряжения, определяемого формулой, аналогичной формуле (2), но для второго образца

$$\sigma''_{12} = (\sigma'_{12} - \sigma'_{22}) - k \sigma'_{22}. \quad (7)$$

Откуда

$$k = \frac{\sigma'_{12} - \sigma'_{22} - \sigma''_{12}}{\sigma'_{22}} \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), получаем соотношение (1), определяющее искомым коэффициент Пуассона.

Определение коэффициента Пуассона горных пород иллюстрируется рис. 1-4, где на рис. 1 и 2 схематично показаны испытательные установки, обеспечивающие необходимые режимы первого цикла механического нагружения первого и второго образцов, соответственно. На рис. 3 схе-

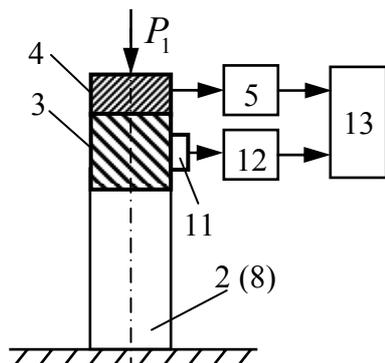


Рис. 3. Схема испытательной установки с каналом регистрации акустической эмиссии

матично показана установка, обеспечивающая одноосное нагружение первого, а затем второго образца, и получение для каждого из них соответствующей зависимости «активность акустической эмиссии – одноосное напряжение». Характерный вид зависимости, получаемой во втором цикле нагружения каждого из образцов, представлен на рис. 4.

Испытательная установка на рис. 1 содержит жесткую кольцевую обойму 1 в виде стакана, в которой помещен первый испытываемый образец 2,

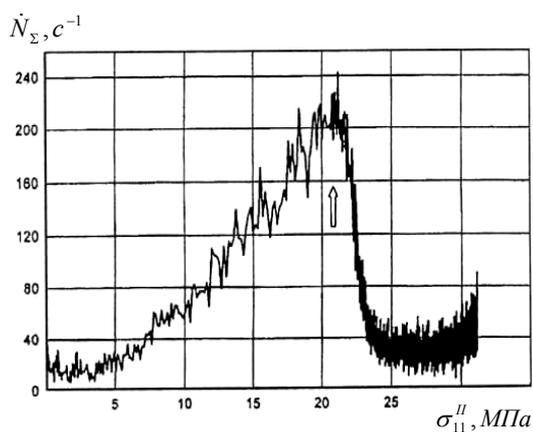


Рис. 4. Зависимость активности акустической эмиссии от осевого напряжения образца

внешний диаметр которого совпадает с внутренним диаметром обоймы 1. В отверстие в верхней части этой обоймы 1 помещен цилиндрический поршень 3, нижний торец которого соприкасается с верхним торцом образца 2. Верхний торец поршня соприкасается с датчиком 4 осевого давления P_1 , создаваемого прессом. К этому датчику подключен измеритель 5 осевого давления, проградуированный в единицах осевого напряжения σ_{11}^I .

Испытательная установка на рис. 2 содержит замкнутую жесткую кольцевую иммерсионную камеру 6, в верхнее круглое отверстие которой помещен резиновый стакан 7, дно которого упирается в дно иммерсионной камеры 6. Верхнее отверстие стакана совпадает и герметично связано с круглым отверстием в верхней части иммерсионной камеры. В резиновый стакан помещен второй испытываемый образец 8, внешний диаметр которого совпадает с внутренним диаметром стакана. Нижний торец образца через дно стакана упирается в дно кольцевой камеры 6, а его верхний торец контактирует с цилиндрическим поршнем 3, размещенным в

верхней части иммерсионной камеры 6. Верхний торец поршня 3, соприкасается с датчиком 4 осевого давления P_1 , создаваемого прессом. К этому датчику подключен измеритель 5 осевого давления, проградуированный в единицах осевого напряжения σ_{12}^I . Внутренняя кольцевая полость иммерсионной камеры заполнена водой и гидравлически связана с управляемым источником 9 избыточного бокового да-

ления P_2 жидкости, которое измеряется манометром 10, проградуированным в единицах бокового напряжения σ_{22}' .

Испытательная установка на рис. 4 представляет собой пресс (условно не показан), регулируемое осевое давление которого передается на первый испытываемый образец 2 (или находящийся на его месте второй испытываемый образец 8) через контактирующие плоскими торцевыми поверхностями цилиндрические датчик 4 осевого давления P_1 и поршень 3. К датчику 4 подключен измеритель 5 осевого давления, проградуированный в единицах осевого напряжения σ_{11}'' (σ_{12}''), а с поршнем 3 акустически связан приемный пьезопреобразователь 11 акустической эмиссии, возникающей в первом или втором образцах. Преобразователь 11 подключен к измерителю 12 ААЭ \dot{N}_Σ . К выходам измерителей 5 и 12 подключен персональный компьютер 13, обеспечивающий построение и регистрацию зависимости «ААЭ \dot{N}_Σ – осевое напряжение σ_{11}'' (или σ_{12}'')». Для определения коэффициента Пуассона горной породы из массива выбуривают керн, из которого путем его разрезания на две равные части получают первый и второй цилиндрические образцы с плоскими и параллельными торцевыми поверхностями.

Первый образец помещают в жесткую кольцевую обойму 1 (см. рис. 1). С помощью прессы создают фиксированный уровень осевого давления P_1 в системе соосно расположенных датчика осевого давления, поршня и первого образца, величину осевого напряжения σ_{11}' в котором измеряют с помощью измерителя 5. При этом, поскольку внешний диаметр образца

равен внутреннему диаметру кольцевой обоймы 1, то в процессе его осевого нагружения обеспечивается режим, при котором $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$, где ε_1 – осевые деформации образца 2, а ε_2 и ε_3 его боковые деформации.

Второй образец помещают в резиновый стакан 7 (см. рис. 2). С помощью прессы в соосно расположенных датчике, поршне и втором образце создают осевое давление P_1 , величину которого, пересчитанную в осевое напряжение σ_{12}' , регистрируют измерителем осевого давления. С помощью источника бокового давления внутри кольцевой иммерсионной камеры создают избыточное боковое давление $P_2 < P_1$ жидкости, которое измеряют с помощью манометра, проградуированного в единицах бокового напряжения $\sigma_{22}' < \sigma_{12}'$, испытываемого вторым образцом. Таким образом, во втором образце реализуют нагружение по схеме Кармана.

Далее первый образец 2 подвергают второму циклу нагружения в установке, представленной на рис. 3. При этом непрерывно измеряют осевое давление P_1 , а следовательно, и напряжение σ_{11}'' . С помощью приемного пьезопреобразователя 11 принимают сигналы АЭ, которые возникают в первом образце при его осевом деформировании. ААЭ \dot{N}_Σ этих сигналов измеряют измерителем 12, сигналы с выхода которого, как и сигналы с выхода измерителя 5, синхронно подают на персональный компьютер 13. На дисплее последнего получают зависимость $\dot{N}_\Sigma = f(\sigma_{11}'')$ для первого образца 2 (см. рис. 4). По этой зависимости определяют величину σ_{11}'' , соответствующую максимуму ААЭ \dot{N}_Σ . В качестве измерителя

12 используется серийно выпускаемая многоканальная акустоэмиссионная аппаратура А-Lin 32D.

Далее по аналогии с первым образцом подвергают второму циклу нагружения второй образец. При этом непрерывно и синхронно измеряют осевое напряжение σ_{12}'' , а также \dot{N}_{Σ} и далее с помощью компьютера получают зависимость $\dot{N}_{\Sigma} = f(\sigma_{12}'')$ для второго образца. Характерный вид этой зависимости аналогичен зависимости, представленной на рис. 4 для первого образца, но будет иметь несколько иной масштаб по осям абсцисс и ординат. По ней определяют величину осевого напряжения σ_{12}'' , соответствующую максимуму ААЭ \dot{N}_{Σ} .

Полученные в результате проведенных экспериментов значения напряжений σ_{11}' , σ_{12}' , σ_{22}' , σ_{11}'' и σ_{12}'' подставляют в формулу (1) и таким образом рассчитывают искомый коэффициент ν Пуассона. Так, например, измерения, проведенные в соответствии с описанным выше алгоритмом, на двух цилиндрических образцах ка-

менной соли Тульской площади Подмосковного соленосного бассейна позволили получить следующие значения напряжений:

$$\sigma_{11}' = 30 \text{ МПа}, \sigma_{12}' = 30 \text{ МПа}, \sigma_{22}' = 6 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{11}'' = 5,45 \text{ МПа}, \sigma_{12}'' = 20,86 \text{ МПа},$$

откуда с учетом выражения (1) имеем значение $\nu = 0,349$, которое отличается от значений ν , полученных с использованием традиционных измерений продольных и поперечных деформаций не более, чем на 3%. Отметим, что получаемое описанным способом значение коэффициента Пуассона является квазистатическим, а не динамическим и, следовательно, должно быть близким к значению, получаемому по стандартизованному алгоритму [2].

Таким образом, представленные выше результаты исследований свидетельствуют о том, что акустоэмиссионные измерения могут стать важным дополнением и даже альтернативой деформационным измерениям при определении коэффициента Пуассона, а возможно и других упругих модулей горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филлимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. М.:Издательство Московского государственного горного университета, 2004, 456 с.
2. ГОСТ 26985-91. Породы горные. Метод определения деформационных ха-

рактеристик при одноосном сжатии. М.: Стандартиформ, 1997, 11 с.

3. Вознесенский А.С., Корчак А.В., Николенко П.В., Шкуратник В.Л. Способ определения коэффициента Пуассона горных пород / Патент RU 2350922, Бюл. №9, 27.03.09. **ПАТЕНТ**

Коротко об авторах

Корчак Андрей Владимирович – профессор, доктор технических наук, ректор,
Шкуратник Владимир Лазаревич – профессор, доктор технических наук, зав. кафедрой,
Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru