

Хромато-масс-спектрометрический анализ алициклических углеводородов нефти традиционно является сложной аналитической задачей [12], однако шестидесятиметровая хроматографическая колонка со слоем 1 мкм 5%-фенил-95%-диметилполисилоксана в тандеме с парофазным дозатором позволяет успешно решать эту проблему.

Кроме успешного разделения диметилциклогексанов и диметилциклопентанов, удалось разделить изомерные диметилбензолы, изопропилметилбензолы, метилпропилбензолы, три- и тетраметилбензолы, метилнафталины.

Таким образом, применение ГХ/МС с колонкой DB-5MS 60 × 0,25 мм × 1 мкм в комплексе с парофазным дозатором TurboMatrix HS позволило получить надежные данные о молекулярном составе хлороформенного аквабитумоида представленного летучими органическими соединениями. Установлено, что при суточном контакте с нефтью без принудительного перемешивания в воду извлекаются в основном ароматические углеводороды, в меньшем количестве нафтеновые. Алифатические углеводороды не обнаружены.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелькановицкая С.Г. Органические вещества подземных вод по данным газохроматографических исследований // Геохимия. – 1980. – № 2. – С. 272-284.
2. Витенберг А.Г. Статический парофазный газохроматографический анализ. Физико-химические основы и области применения // Российский химический журнал. – 2003. – Т. XLVII. – № 1. – С. 7-22.
3. Другов Ю.С., Родин А.А. Пробоподготовка в экологическом анализе. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 855 с.
4. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 270 с.
5. Сотников Е.Е., Загайнов В.Ф., Михайлова Р.И., Милочкин Д.А., Рыжова И.Н., Корнилов И.О. Парофазный анализ летучих органических соединений в питьевой воде методом газовой хроматографии // Гигиена и санитария. – 2014. – № 2. – С. 92-96.
6. Крылов А.И., Лопушанская Е.М., Александрова А.Г., Конопелько Л.Л. Определение полиароматических углеводородов методом газовой хроматографии–масс-спектрометрии с изотопным разбавлением (ГХ/МС/ИР) // Аналитика. – 2012. – №3. – С.6-16.
7. Одинцова Т.А. Геохимическая характеристика состава аквабитумоидов нафтидного типа // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. вып. 12 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 58-61.
8. Бачурин Б.А., Одинцова Т.А. Экоаналитическая идентификация источников органического загрязнения природных геосистем // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 62-65.
9. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. – 493 с.
10. Wang Z., Fingas M., Using Biomarker Compounds to Track the Source of Spilled Oil and to Monitor the Oil Weathering Process // LC GC-Magazine of separation science. – 1995. – V. 13, № 12. – P. 950-958.
11. Wang Z., Fingas M., Li K. Fractionation of a light crude oil and identification and quantitation of aliphatic, aromatic, and biomarker compounds by GC-FID and GC-MS. Part II // Journal of Chromatographic Science. – 1994. – V. 32, № 9. – P. 367-382. DOI: 10.1093/chromsci/32.9.367.
12. Петров А.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 263 с.: ил.
13. Павловский А.А. Проявление влияния динамической модификации неполярной фазы анализаторами на их газохроматографические параметры удерживания: дис. ... канд. хим. наук; 02.00.02 / Павловский Александр Александрович. – СПб., 2016. – С. 16.

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.831.1

DOI:10.7242/echo.2019.3.7

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА КАЙЗЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Н.Л. БЕЛЬТЮКОВ

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье представлена перспективная концепция измерения напряжений в массиве пород на основе эффекта Кайзера. Рассмотрены основные теоретические модели, описывающие данное явление в породах, а также их следствия и фундаментальные ограничения. Выполнен обзор методов контроля напряжений, в которых используется эффект Кайзера, показаны их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, эффект Кайзера, напряжения, массив горных пород, механизм трещинообразования.

Введение

На сегодняшний день существуют два основных инструментальных метода измерения напряжений: гидроразрыв скважины и метод полной разгрузки керн в скважине. Совершенствование данных методов идет непрерывно, в результате чего удалось добиться высокой степени достоверности результатов. Однако ограниченность условий их применения, а также трудоемкость и высокая стоимость реализации обуславливают развитие альтернативных способов, среди которых интерес представляют методы на основе эффекта Кайзера в породах. Их преимущество заключается в том, что для определения действующих напряжений отсутствует необходимость проведения сложных высокоточных измерений деформаций и не требуется использование аппарата теории упругости. В связи с этим данные методы позволяют определять напряжения в условиях массивов квазипластичных и трещиноватых скальных пород, где измерение другими способами затруднено.

Эффект Кайзера заключается в отсутствии акустических импульсов в геоматериалах при циклическом нагружении до тех пор, пока не достигнут максимальный уровень нагрузки предыдущего цикла (рис. 1). Превышение нагрузкой этого значения приводит к возобновлению акустической эмиссии (АЭ), что выражается в скачкообразном увеличении параметра активности (количество импульсов в единицу времени). Эффект впервые был открыт Й. Кайзером в 1953 г. при циклических испытаниях металлов [1].

Ранние исследования, посвященные определению напряжений с помощью эффекта Кайзера, основывались на предположении, что породы в массиве испытывают первоначальный цикл нагружения за счет действия гравитационных и тектонических сил. Тогда производя в лабораторных условиях повторное нагружение образцов пород, извлеченных из массива, можно оценить нормальную компоненту первоначального поля напряжений, действующую в направлении нагружения. Позднее была показана несостоятельность данного подхода в связи с тем, что породы в массиве находятся в условиях сложного напряженного состояния, тогда как в лаборатории предполагается выполнять нагружение керн в режиме одноосного сжатия. Вместо этого на основе разработанных теорий формирования эффекта Кайзера были предложены другие режимы тестового нагружения пород, извлеченных из массива.

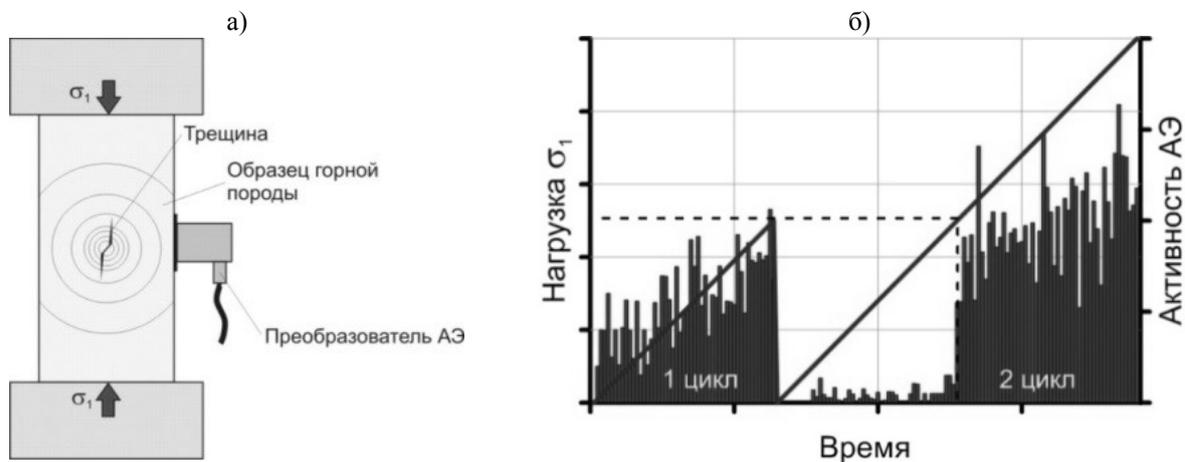


Рис. 1. Проявление эффекта Кайзера в горных породах: а – схема нагружения образца в режиме одноосного сжатия; б – идеализированный график зависимости активности акустической эмиссии при циклическом нагружении породы

Несмотря на обширные лабораторные эксперименты по изучению проявления эффекта Кайзера в породах на наш взгляд имеются некоторые противоречия между результатами теоретических исследований и практическими примерами использования данного явления. Это позволяет говорить о недостаточной изученности причин возникновения эффекта, что накладывает существенные ограничения на его применение для оценки напряженного состояния пород в массиве. Рассмотрим особенности наиболее значимых теоретических представлений о механизме проявления эффекта Кайзера в породах и важные следствия этих теорий, которые легли в основу предлагаемых методов определения напряжений.

Модели проявления эффекта Кайзера в горных породах

Считается, что основными источниками акустической эмиссии при деформировании горных пород являются образование и рост трещин, а также скольжение по поверхностям существующих трещин или нарушений и границам зерен [2]. Обычно проявление эффекта Кайзера в породах связывают с особенностями механизма трещинообразования. Большинство моделей трещинообразования основываются на предположении, что при нагружении породы формируются трещины растяжения, ориентированные вдоль наибольшего главного напряжения σ_1 (рис. 1, а). При этом рост трещин сопровождается АЭ, а их размер пропорционален величине приложенной нагрузки. Разгрузка породы инициирует закрытие трещин. В случае повторного нагружения трещины раскрываются, но не увеличиваются в размере до тех пор, пока нагрузка не достигнет максимального значения предыдущего цикла. Если в модели не учитывается трение между берегами трещин, то акустическая эмиссия при этом будет отсутствовать. Когда величина действующего напряжения превысит максимальное значение предыдущего цикла, рост трещин возобновляется, что сопровождается резким увеличением активности АЭ, т.е. возникает эффект Кайзера (рис. 1, б). Математическое описание механизма проявления эффекта сводится к получению условий возобновления роста трещин и акустической эмиссии соответственно.

В одном из ранних математических описаний механизма трещинообразования в породах Costin L.S. использовал форму трещин растяжения в виде плоского диска диаметром a , положение и ориентация которого в пространстве характеризуются вектором нормали \vec{n} к плоскости диска [3]. В работе было получено соотношение между размером трещины растяжения и локальными напряжениями, действующими в ее области. С помощью данного выражения можно определить величины напряжений необходимые для возобновления роста трещин, образовавшихся в первоначальном цикле нагружения. Если в координатах главных напряжений изобразить совокупность точек, соответствующих множеству напряженных состояний, при которых данное условие выполняется хотя бы для одной трещины, то образуется некоторая поверхность (рис. 2, а). Данная поверхность получила название *поверхности поврежденности* и оконтуривает область, внутри которой напряженные состояния породы не приводят к росту трещин и, соответственно, акустической эмиссии.

Описание механизма проявления эффекта Кайзера в породах с помощью поверхности поврежденности использовал Holcomb D.J. в работе [4]. Он предположил, что извлеченные из массива породы имеют некоторую нарушенность, за счет которой формируется первоначальная поверхность поврежденности. Одноосное нагружение породы вдоль одной из главных компонент первоначального поля напряжений будет выглядеть как перемещение по данной оси точки, характеризующей текущее напряженное состояние породы (рис. 2, б). При этом рост трещин и акустическая эмиссия отсутствуют. Когда напряженное состояние породы достигнет первоначальной поверхности роста трещин и эмиссия акустических импульсов возобновятся, т.е. будет наблюдаться эффект Кайзера. Дальнейшее увеличение нагрузки приведет к растягиванию поверхности вдоль оси нагружения. В случае разгрузки породы и ее повторном нагружении вдоль той же оси размер трещин не увеличивается, и акустическая эмиссия отсутствует до тех пор, пока вновь не будет достигнута поверхность поврежденности, сформированная в предыдущем цикле.

Основные следствия данной модели, подтвержденные экспериментально, следующие. В случае трехосного осесимметричного сжатия породы в первом цикле ($\sigma_1^I > \sigma_2^I = \sigma_3^I$) величина одноосной нагрузки, которую необходимо приложить во втором цикле вдоль оси σ_1^I для возникновения эффекта Кайзера, линейно зависит от напряжений σ_1^I и σ_3^I . При одноосном нагружении породы во втором цикле в направлении осей σ_2^I или σ_3^I эффект Кайзера отсутствует, т.к. поверхность поврежденности не изменилась вдоль данных осей в первом цикле нагружения.

Pestman B.J. и van Munster J.G. использовали в своих исследованиях двухмерную модель "крылатой" трещины (Z-образной трещины), состоящей из наклонной сдвиговой трещины и двух трещин растяжения (рис. 3, а) [5]. Согласно данной модели в породе в первоначальном состоянии присутствует некоторое количество наклонных дефектов: микротрещины, границы между зернами, плоскости напластования и т.д. При нагружении породы на наклонных дефектах возникают касательные напряжения, кото-

рые приводят к взаимному сдвигу их берегов. В результате в краевых частях из-за концентрации растягивающих напряжений образуются трещины растяжения в виде "крыльев". С увеличением нагрузки "крылья" трещины растут в направлении максимального главного напряжения σ_1 , генерируя при этом импульсы АЭ. Особенность данной модели заключается в существовании перелома поверхности поврежденности в точке, характеризующей первоначальное напряженное состояние породы (рис. 3, б).

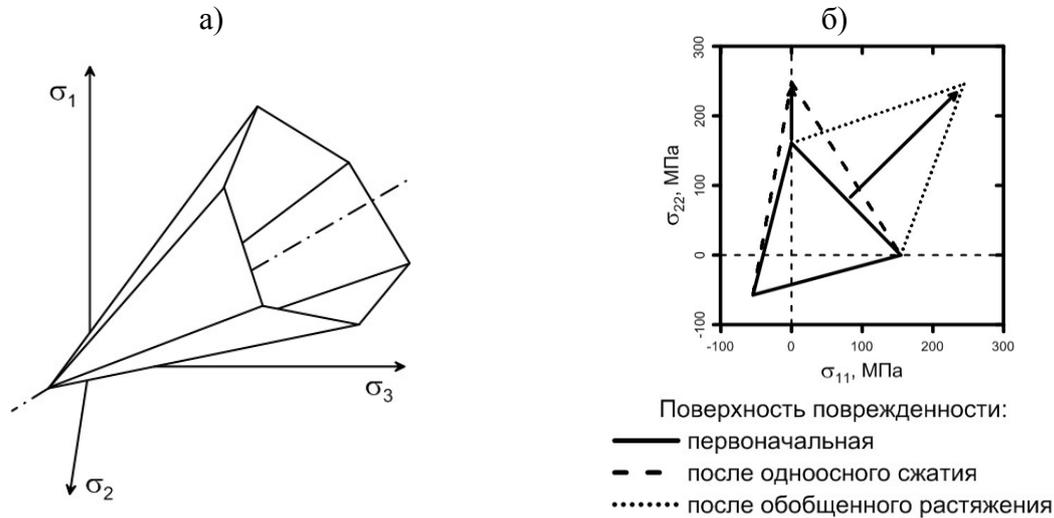


Рис. 2. Гипотетический общий вид поверхности поврежденности (а) и изменение ее проекции в случае изотропного распределения трещин [4] (б)

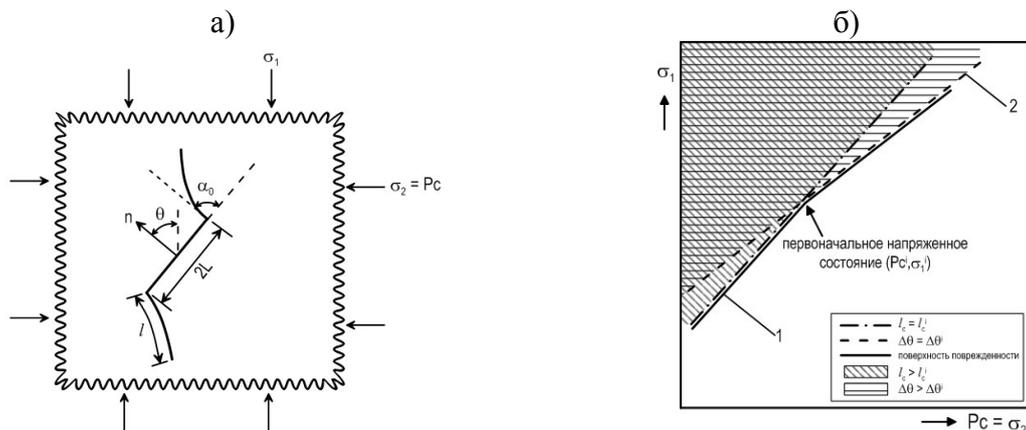


Рис. 3. Схематичное изображение двумерной модели "крылатой" трещины (а) и вид соответствующей поверхности поврежденности [5] (б)

Также данными исследователями была предложена методика сканирования поверхности поврежденности путем циклического нагружения образцов по специальной схеме, где индикатором достижения поверхности служит эффект Кайзера. По результатам испытаний образцов по данной методике была получена полная поверхность поврежденности в трехмерном пространстве главных напряжений " $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$ ", сформированная в условиях трехосного неравнокомпонентного сжатия установочного цикла ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). При этом установлено, что максимальную кривизну полная поверхность поврежденности испытывает в области первоначального напряженного состояния породы [6].

Шкуратником В.Л. и Лавровым А.В. разработана трехмерная модель "крылатой" трещины, состоящей из наклонного дискообразного дефекта и двух трещин растяжения [7]. В целом, механизм трещинообразования в данном случае аналогичен двумерному варианту, рассмотренному выше. Особенность данной модели заключается в том, что с ее помощью получены условия возобновления роста трещин в трехмерном пространстве. Это позволило провести важный численный эксперимент по моделированию про-

явления эффекта Кайзера в случае трехосного неравнокомпонентного напряженного состояния породы в установочном цикле ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Также необходимо отметить, что в модели учитывается трение при сдвиге берегов наклонной трещины.

В рассмотренных теоретических моделях в качестве причины возникновения эффекта Кайзера при повторном нагружении породы предполагается процесс возобновления роста ориентированных трещин, обуславливающий увеличение активности АЭ. Из этого следует, что добиться активизации трещин в тестовом цикле можно осуществляя одноосное нагружение только в направлениях близких к оси действия напряжения σ_1 установочного цикла. При этом порода запоминает линейную комбинацию главных напряжений. В случаях нагружения в направлениях напряжений σ_2 или σ_3 , т.е. перпендикулярно ориентации индуцированных в установочном цикле трещин, эффект Кайзера будет отсутствовать. Несмотря на то, что данное положение доказано лабораторными экспериментами на образцах горных пород [4, 7, 8], в литературе существуют примеры наблюдений эффекта Кайзера при одноосном нагружении керна в различных направлениях [9-12]. Это позволило некоторым исследователям сделать вывод о наличии другого механизма проявления эффекта в случае первичного нагружения керна горных пород.

Известно, что после разгрузки от действующих в массиве напряжений породы испытывают всестороннее расширение, вследствие чего в них возникает анизотропная трещиноватость, отражающая природное поле напряжений (рис. 4) [13-15]. Поэтому Holcomb в работе [4] выдвинул идею, что в тестовом цикле нагружения керна в режиме одноосного сжатия скачкообразное увеличение акустической эмиссии может происходить за счет разрушения шероховатостей берегов трещин в процессе их закрытия. Причем предполагается, что данное явление имеет место, когда нагрузка достигает величины нормального напряжения, действовавшего в массиве в направлении оси нагружения. В связи с этим Holcomb предложил различать два вида эффекта Кайзера в горных породах. Первый вид возникает в результате циклического нагружения образцов горных пород в лабораторных условиях, когда известно напряженное состояние предыдущего цикла. Такой искусственно наведенный эффект Кайзера Holcomb называет *лабораторным*. Основным механизмом формирования данного вида выступает возобновление роста ориентированных трещин. Второй вид можно наблюдать в первоначальном цикле нагружения извлеченного из массива керна, когда история об испытываемых породой напряжениях неизвестна, т.н. *природный эффект Кайзера*.

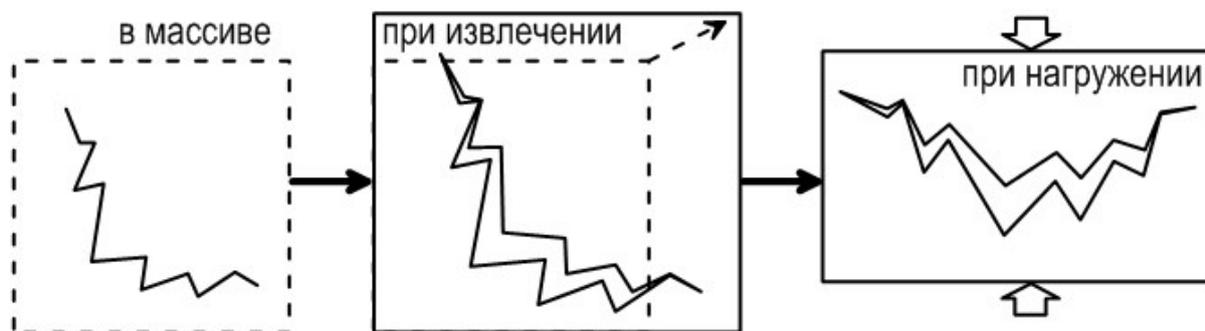


Рис. 4. Схематичное изображение состояний трещин при извлечении породы из массива и последующем ее нагружении [13]

Таким образом, Holcomb предложил *альтернативную гипотезу* возникновения памяти о напряженном состоянии пород в массиве в момент извлечения их из недр за счет образования трещин при всестороннем расширении керна после снятия естественного поля напряжений. Это позволило объединить многие наблюдения эффекта Кайзера при одноосном нагружении керна в различных направлениях и противоречащие им теоретические исследования. Однако данная гипотеза осталась только на стадии предположения и на сегодняшний день информация о характере поведения активности АЭ при уплотнении пород, т.е. при закрытии трещин, отсутствует.

Анализ рассмотренных выше теоретических моделей показывает, что у исследователей в данной области до сих пор не сформировано единой концепции, описывающей механизм возникновения эффекта Кайзера в породах. Данное обстоятельство объясняет существование различных подходов в использовании эффекта для определения напряжений в массиве.

Методы измерения напряжений на основе эффекта Кайзера

Тривиальный подход к использованию эффекта Кайзера для оценки тензора природного поля напряжений, как уже было отмечено выше, заключается в *одноосном нагружении* в 6-ти направлениях образцов керн, извлеченного из массива. В работах [9-12] результаты определения напряжений таким способом убедительно согласуются с данными, полученными другими методами.

Другой подход к использованию метода одноосного нагружения керн следует из теоретических моделей проявления эффекта Кайзера, основанных на возобновлении роста ориентированных трещин [4, 7, 8]. Согласно данным представлениям определить компоненты поля напряжений в таком случае не представляется возможным. Можно оценить только направление действия максимального главного напряжения σ_1 по наиболее отчетливому проявлению эффекта, а также линейную комбинацию главных напряжений, когда одноосное сжатие в тестовом цикле осуществляется точно в направлении напряжения σ_1 [7]. Используя данный подход в работе [16] удалось оценить горизонтальные напряжения в массиве соляных пород по результатам испытаний керн скважин в вертикальном направлении. При этом предполагалось, что максимальная компонента σ_1 действует в вертикальном направлении, а ее величина принималась равной весу толщи вышележащих пород; горизонтальные компоненты равны ($\sigma_2 = \sigma_3$), и эффект Кайзера в тестовом цикле возникает при достижении нагрузкой разности $\sigma_1 - \sigma_3$.

Величины главных компонент поля напряжений в массиве используя представления, основанные на возобновлении роста трещин, можно определить методом, разработанным Pestman B.J., Kenter C.J. и van Munster J.G. (*PKM-метод*) [6, 17]. Важным следствием предложенной ими модели является экспериментально доказанное положение, что форма поверхности поврежденности имеет максимальную кривизну в области точки, характеризующей природное напряженное состояние пород в массиве. В связи с этим суть РКМ-метода заключается в "сканировании" поверхности поврежденности породы (рис. 5), извлеченной из массива, выполняя циклическое нагружение керн вертикальных скважин в режиме трехосного неравнокомпонентного сжатия ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). При этом необходимо, чтобы все три оси в тестовом цикле нагружения совпадали с направлениями главных напряжений в массиве, а вертикальное напряжение σ_V принимается равным величине давления бурового раствора на глубине отбора керн. В этом случае, как считают авторы, можно определить величины горизонтальных напряжений σ_H и σ_h . Несмотря на то, что методом РКМ можно определить величины только двух главных компонент природного поля напряжений, причем для этого необходимо знать ориентацию всех трех главных компонент в массиве, в ряде случаев его применение может оказаться целесообразным. Часто направления горизонтальных напряжений можно оценить менее трудозатратными и дорогостоящими методами, например, по разрушению стенок скважины, а величина вертикального напряжения редко превышает вес вышележащей толщи пород.

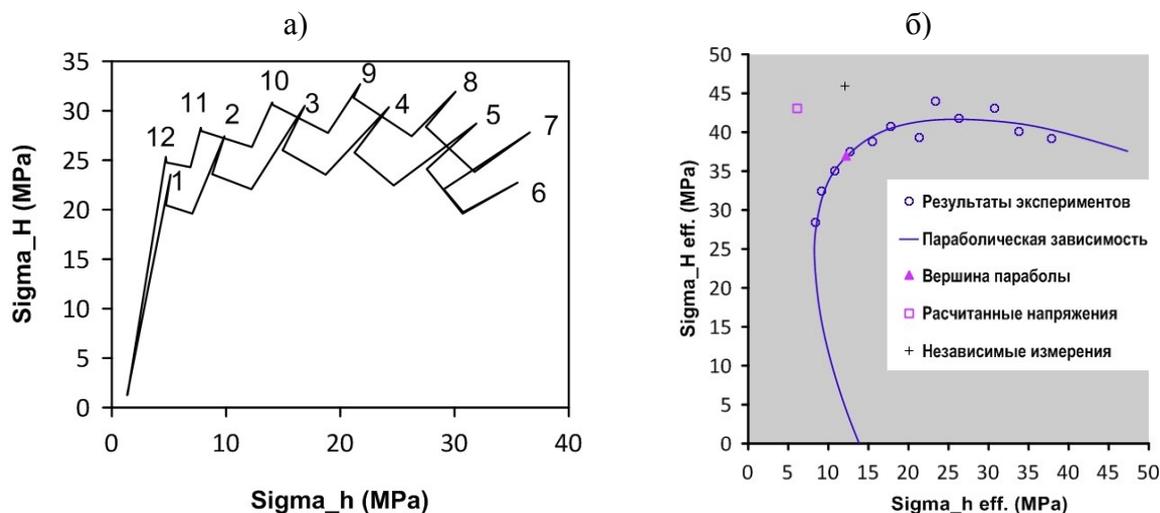


Рис. 5. Схема нагружения образца при "сканировании" поверхности поврежденности (а) и результаты определения горизонтальных напряжений σ_H и σ_h РКМ-методом (б) [17]

Различные варианты подхода *трехосного нагружения* *керна* предложили Шкуратник В.Л. и Лавров А.В. в работе [7]. Так как они тоже использовали теоретическую модель проявления эффекта Кайзера на основе возобновления роста трещин, то для определения напряжений предлагаемыми способами необходима априорная информация о природном поле напряжений.

В связи с тем, что в первоначальном цикле нагружения породы формируется ориентированная трещиноватость, то некоторые исследователи предлагают для ее активизации использовать *режим растяжения* [4, 18]. По сравнению с одноосным сжатием режим растяжения является более избирательным и приводит к росту только тех трещин, которые ориентированы в направлении, ортогональном оси растяжения. Тем не менее, как показывают результаты численного эксперимента в [4], определить данным методом абсолютные величины главных компонент поля напряжений не представляется возможным. В лучшем случае можно оценить направления главных напряжений, а также девиатор тензора напряжений.

Чувствительность к отклонению оси нагружения в тестовом цикле от направления максимального главного напряжения σ_1 установочного цикла является важной особенностью при использовании эффекта Кайзера для определения напряжений. Данную особенность использовал Николенко П.В. в работе [18] при разработке метода определения величины и направления максимального главного напряжения. Суть предлагаемого метода заключается в размещении в измерительном шпуре на заданной глубине эластичной капсулы, заполненной эпоксидной смолой с отвердителем. После полной полимеризации смолы затвердевший композиционный цилиндр начинает воспринимать нагрузку, вызываемую деформацией стенок шпура, в результате чего в указанном цилиндре формируется память о величине максимального главного напряжения. Затем цилиндр извлекается из шпура и разрезается на несколько одинаковых по толщине дисков, которые нагружаются *бразильским способом* под разными углами. По ориентации диска, в котором эффект Кайзера выражен наиболее ярко, судят о направлении действия максимального главного напряжения, а значение осевой нагрузки, при которой он наблюдается, соответствует величине напряжения, действующего в массиве [18].

Также кроме лабораторных испытаний пород, извлеченных из массива, существует натуральный вариант реализации метода определения напряжений на основе эффекта Кайзера. Метод *нагружения околоскважинной области массива* заключается в локальной разгрузке некоторой области массива посредством бурения скважины и последующем нагружении ее стенок прессиомером или гидродомкратом с одновременной регистрацией импульсов АЭ. О восстановлении породами околоскважинного пространства естественного напряженного состояния судят по скачкообразному увеличению параметров АЭ. Важным преимуществом такого подхода перед лабораторными испытаниями *керна* является то, что осуществляется разгрузка и повторное восстановление только одной компоненты поля напряжений – радиальной [19]. Данное обстоятельство, на наш взгляд, нивелирует проблему несоответствия условий нагружения в установочном и тестовом циклах, и связанное с этим различие в механизмах трещинообразования, что является фундаментальным вопросом при разработке методов измерения напряжений на основе эффекта Кайзера.

Заключение

Методы измерения напряжений на основе эффекта Кайзера имеют явные преимущества перед остальными методами, которые заключаются в простоте концепции, низкой трудоемкостью выполняемых операций и высокой скоростью получения результатов. Однако для корректной интерпретации измерений необходимо иметь отчетливое понимание природы данного явления. Разработанные на сегодняшний день теоретические модели проявления эффекта не позволяют в полной мере описывать случаи его наблюдения в *кернах* и при нагружении околоскважинной области массива пород, где скорее всего имеет место другой механизм его возникновения. Также в данном контексте рассмотрения проблемы необходимо ответить на вопрос в какой момент формируется память о напряженном состоянии пород в массиве: под действием естественного поля напряжений или в момент его нарушения посредством бурения скважины. В связи с этим требуется разработка и экспериментальное обоснование новых моделей проявления эффекта Кайзера в породах, которые основаны не только на гипотезе возобновления роста трещин, а на других механизмах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-45-590004

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. – 1953. – V. 24. – P. 43-45.
2. Лавров А.В., Шкуратник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51, № 5. – С. 6-18.
3. Costin L.S. A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock // Journal of Geophysical Research. – 1983. – V. 88, № B11. – P. 9485-9492.
4. Holcomb D.J. General theory of the Kaiser effect // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. – 1993. – V. 30, № 7. – P. 929-935.
5. Pestman B.J., Van Munster J.G. An acoustic emission study of damage development and stress-memory effects in sandstone // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics. – 1996. – V. 33, № 6. – P. 585-593.
6. Pestman B.J., Kenter C.J., VanMunster J.G. Estimation of In-situ Stress Magnitudes from Measurements on Cores // Proceedings of the SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference. – 1998. – V. 1. – P. 171-177.
7. Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. – М.: МГУ, 2004. – 450 с.: ил.
8. Li C., Nordlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 1993. – V. 26, № 4. – P. 333-351.
9. Seto M., Nag D.K., Vutukuri V.S. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission and deformation rate analysis // Geotechnical and Geological Engineering. – 1999. – V. 17, № 3, 4. – P. 241-266.
10. Villaescusa E., Seto M., Baird G. Stress measurements from oriented core // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39. – № 5. – P. 603-615.
11. Lehtonen A.V., Särkkä P. Evaluation of rock stress estimation by the Kaiser effect // Proceedings of the International Symposium on In-situ rock stress – In-situ rock Stress Measurement, Interpretation and Application. – 2006. – P. 135-142. Код 74074.
12. Momayez M., Hassani F.P. Application of the Kaiser effect to measure in situ stresses in underground mines // 33rd US Symposium on Rock Mechanics, USRMS. – 1992. – P. 979-987.
13. Hsieh A., Dight P. The desirable and undesirable effects on stress reconstruction using the deformation rate analysis (ORA) // ISRM 7th International Symposium on In-Situ Rock Stress, Tampere, Finland, 10-12 May 2016. – Tampere, 2016. – P. 213-224.
14. Siegfried R., Simmons G. Characterization of oriented cracks with differential strain analysis // Journal of Geophysical Research. – 1978. – V. 83, № B 3. – P. 1269-1278.
15. Yamamoto K. A theory of rock core-based methods for in-situ stress measurement // Earth, Planets and Space. – 2009. – V. 61, № 10. – P. 1143-1161.
16. Асанов В.А., Токсаров В.Н. Экспериментальное определение напряжений в соляном массиве с использованием эффекта Кайзера // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. междунар. конф. / ИГД СО РАН. – Новосибирск, 1999. – С. 147-151.
17. Pestman B.J., Holt R.M., Van Munster J.G. Field application of a novel core-based in-situ stress estimation technique // Proceedings of the SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference. – 2002. – P. 81-87.
18. Николенко П.В. Аппаратурное и методическое обеспечение контроля сложного напряженного состояния массива с использованием эффектов памяти в упругих композиционных датчиках // Горн. информ.-аналит. бюл. (науч.-техн. журн.). – 2019. – № 2. – С. 97-104.
19. Бельтюков Н.Л. Разработка скважинного метода измерения напряжений в массиве горных пород на основе эффекта Кайзера: автореф. дис. ...к.т.н.; 25.00.20: защищена 11.04.19 / Бельтюков Николай Леонидович. – Пермь, 2019. – 20 с.

УДК 622.834.52

DOI:10.7242/echo.2019.3.8

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАТИВНОЙ СКОРОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

А.В. ЕВСЕЕВ, А.А. УДАРЦЕВ
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. Рассмотрен подход к определению нормативной скорости поперечного деформирования междукамерных целиков. Изложены рекомендации по организации инструментального контроля устойчивости на основе измерения горизонтальной конвергенции.

Ключевые слова: междукамерный целик, устойчивость, скорость деформирования, поперечная деформация, горизонтальная конвергенция.

Контроль состояния выработанного пространства и изучение процессов деформирования элементов системы разработки играет важную роль при освоении месторождений полезных ископаемых подземным способом. В результате визуального обследования и инструмен-