

## Интерпретация сейсмической анизотропии в трещинных коллекторах. Interpreting seismic anisotropy in fractured reservoirs

M.H.Worthington\*

### Реферат

Верхний предел упругой деформации отдельных трещин в резервуаре может быть определен с учетом оценок эффективного давления вышележащих пород и среднего раскрытия трещин, которое обычно известно по данным каротажа и анализа керна. Затем полученные значения могут использоваться вместе с численным моделированием упругих волн для определения верхнего предела анизотропии сейсмических скоростей, которая может быть следствием любой описанной дискретной модели трещиноватости коллектора. Это обеспечивает уровень доверия при использовании сейсмической анизотропии как показателя наличия трещиноватости, которая может способствовать увеличению проницаемости коллектора. Наименее точным аспектом предлагаемой методики является оценка отношения нормальной упругой деформации к деформации сжатия.

### Введение

Анизотропия сейсмических скоростей может быть следствием разных причин, от строения породы, микротрещин в зернах породы, переслаивания пород и объединения трещин разного масштаба, приводящих к тому, что мощности пластов и расположение трещин слабо соотносятся с длинами сейсмических волн. Каждущаяся азимутальная анизотропия скоростей нормального приращения также может быть следствием структурных падений. Если анизотропия сейсмических скоростей должна использоваться для построения или ограничения трещинной модели коллектора, необходимо определить относительный вклад (степень влияния) этих различных причин. Например, причиной похожих значений азимутальных вариаций в сейсмических скоростях могут быть однородные микротрещины в масштабе зерен породы или группы трещин длиной от метра до десятка метров, а разница в проницаемости коллектора для этих двух случаев может быть огромной.

Общий подход – удостовериться в причинной связи между сейсмической анизотропией и однородной трещиноватостью, для чего использовать съемки методом непротодольного ВСП на разных азимутах и соответствующие изменения скоростей и азимута для определения направленности гидравлических проводящих трещин, выделенных по данным каротажа. Затем карты анизотропии сейсмических скоростей, полученные по результатам поверхностных сейсмических 3D съемок, могут использоваться для наложения условий на множественные стохастические реализации разломных моделей, которые затем подвергаются апскейлингу для заполнения сеточной модели резервуара (Barr et al., 2007).

В качестве варианта, начальной точкой может быть модель разобщенной системы трещин (DFN) для коллектора. Путем численного моделирования упругих волн модели DFN получаются синтетические сейсмические данные, которые затем сравниваются с зарегистрированными полевыми сейсмическими данными (Will et al., 2005). Но основе анализа расхождений между наблюдаемыми и синтетическими данными происходит отладка и уточнение модели.

В целом, при описанных подходах обычно не рассчитывают на однозначные модели. Однако сейсмическая анизотропия сужает круг возможных моделей резервуара.

Важным этапом в технологии, разработанной Will et al. (2005), является выбор значений упругой деформации трещин для использования в сейсмическом моделировании. Упомянутая здесь упругая деформация измеряется в  $\text{мПа}^{-1}$  и относится к отдельным трещинам, в отличие от упругой деформации трещиноватой среды, измеряемой в  $\text{Па}^{-1}$ . Полевые и лабораторные оценки индивидуальной упругой деформации встречаются очень редко (немногочисленны), поэтому выбранные значения обычно основываются на теоретических выкладках, из-за чего весьма гипотетические. В данной статье утверждается, что верхний предел упругой деформации трещин внутри коллектора может быть определен и, с учетом современных ограничений экспериментальных данных, принят как наиболее надежная и полезная оценка. Затем в результате численного моделирования упругих волн получаются значения верхнего предела анизотропии сейсмических скоростей для выбранной модели трещиноватости коллектора. Вероятно полезным выводом из таких экспериментов может быть утверждение, что трещины, которые в существенной степени обеспечивают проницаемость коллектора, либо не обнаружимы сейсмическими методами, либо являются только частью причины наблюдаемой сейсмической анизотропии. Из этого следует, что сейсмическую анизотропию как атрибут при построении модели резервуара следует использовать с большой осторожностью. Другой результат еще более неопределенный. Рассчитанная сейсмическая анизотропия, которая равна или превышает наблюденные значения, при использовании верхних значений упругой деформации, либо означает, что наша модель трещиноватости согласуется с сейсмическими данными, либо что оценки упругой деформации трещин были слишком высоки. Другими словами, хотя данные сейсмической анизотропии соответствуют выбранной модели трещиноватости, они не дают оснований для уверенности в достоверности модели.

### Экспериментальные данные упругой деформации трещин

По логике, первый шаг – это поиск лабораторные и полевые оценки упругой деформации трещин. Рисунок 1 и Таблица 1 представляют результаты такого поиска в недавних публикациях. Значения на горизонтальной оси Рисунка 1 – это только оценки порядка значений средней протяженности трещин в каждом эксперименте.

\* Department of Earth Sciences, Oxford University, Parks Road, Oxford OX1 3PR, UK.  
E-mail: Michael.Worthington@earth.ox.ac.uk.

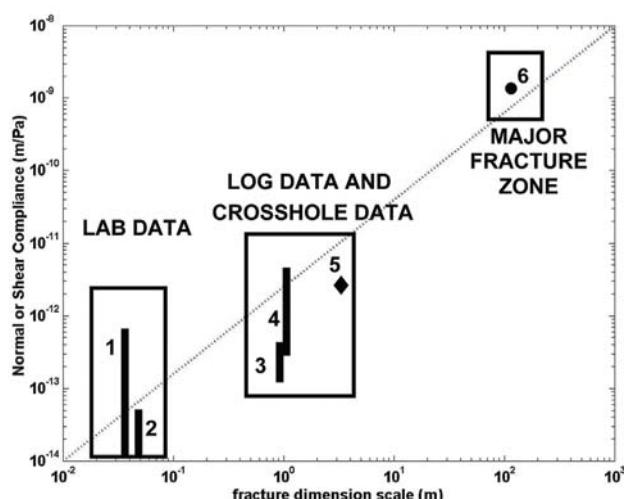


Рисунок 1 Обобщенные лабораторные и полевые оценки динамических упругих деформаций трещин

Кажется, что рисунок означает, что значения упругой деформации возрастают с размерами трещин. Однако, все что можно заключить с некоторой определенностью, это то, что значения, полученные по каротажу и мелкомасштабным межскважинным исследованиям (точки 3, 4 и 5) примерно того же порядка, что и у лабораторных данных (точки 1 и 2). Не существует расчетных оценок упругой деформации для трещин длиной от 1 до нескольких десятков метров. Таким образом, экспериментальные данные дают весьма слабое представление о том, как упругая деформация трещин может изменяться при разных значениях размеров трещин, которые способны ощутимо влиять на проницаемость коллектора. Точка 6 это оценка упругой деформации сдвига в основной зоне трещиноватости в южной части Северного моря. Этот результат будет рассмотрен ниже, поскольку он относится к выбору процентного отношения упругой деформации сдвига при моделировании. В следующем разделе рассматриваются только расчетные значения упругой деформации.

### Определение максимальных расчетных упругих деформаций трещин

Расчетная упругая деформация,  $Z_n$ , круговой сухой трещины радиусом  $a$ ,

$$Z_n = \frac{16a(1-\nu^2)}{3\pi E}$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $E$  – модуль Юнга скелета породы (Sayers и Kachanov, 1995). Сухой в данном контексте означает, что теория не принимает в расчет эффект сжимаемости любой заполняющей трещину жидкой или газообразной фазы. Поскольку нас интересуют максимальные упругие деформации, эта формула будет полезной. Трещина будет закрываться, если будет возрастать давление по нормали к ней, и она совсем закроется, если значение давления по нормали достигнет  $b/Z_n$ , где  $b$  – ширина трещины (раскрытие). Следовательно, нормальное давление, требуемое для закрытия скважины,  $\sigma_c$ , равно

$$\sigma_c = \frac{3\pi E \alpha}{8(1-\nu^2)}, \quad (2)$$

где  $\alpha = b/2a$ , коэффициент сжатия трещины.

Сложно получить достоверные оценки длин и раскрытий трещин, расположенных на глубине. До тех пор, пока горизонтальное бурение не стало обычной практикой, неизбежно трещины были плохо представлены в образцах, поскольку считается, что трещины на глубинах более 1,5 км по большей части субвертикальные, и потому неадекватно представлены в образцах из субвертикальных скважин. Достаточно очевиден верхний предел раскрытий, который можно измерить по керну, поскольку большие апертуры будут больше диаметра скважины. Несомненно, на глубине существуют трещины с апертурой 10-20 см и более. На рисунке 2 показаны несколько заполненных кальцитом трещин в платформенных карбонатах в горах Омана. Предположительно, эти трещины были в какое-то время незасементированы, предположительно открыты повышенным поровым давлением или региональными напряжениями. Единственный вопрос, который может заинтересовать нас в этом случае – существуют ли такие трещины в настоящее время в коллекторах, которые мы пытаемся разрабатывать. Если они существуют, их должно быть можно обнаружить на диаграммах FMI (Formation Micro Imager – микрофотоприемник) в субгоризонтальных скважинах. Однако нет проблем получить доказательства существования открытых трещин в углеводородсодержащих коллекторах с апертурами более 5 мм. Nelson (2001) приводит сводку по опубликованным размерам апертур. Он включил одно значение в 5 мм, но большинство – 1 мм и меньше.

$Z_n \text{ (m Pa}^{-1}\text{)}$	$Z_t \text{ (m Pa}^{-1}\text{)}$	Вид исследования	Авторы
1. $0.7-2.2 \times 10^{-14}$	$1.3-4.4 \times 10^{-14}$	лабораторный	Lubbe <i>et al.</i> (2008)
2. $0.05-4.7 \times 10^{-13}$	$0.01-1.6 \times 10^{-14}$	лабораторный	Pyrak-Nolte <i>et al.</i> (1990)
3. $0.83-3.8 \times 10^{-13}$		ВСП	Hardin <i>et al.</i> (1987)
4. $0.25-3.5 \times 10^{-12}$		Акустический	Lubbe и Worthington (2006)
5. $2.0 \times 10^{-12}$		каротаж	
		межскважинное: $\lambda = 0.1 \text{ м}$	Myer <i>et al.</i> (1995)
6.	$1.0 \times 10^{-9} \text{ VSP}$	ВСП	Worthington и Hudson (2000)

Таблица 1 Сводные данные о значениях нормальной и сдвиговой упругой деформации трещин.

Расчеты для иллюстрации в этой статье приводятся по данным месторождения Clair Field, расположенного к западу от Шетландских островов в Северной Атлантике. Такой выбор объясняется большим объемом открытых, доступных данных по этому интересному, преимущественно трещинному резервуару. Основываясь на доказательствах, полученных из керна и изображений из скважины, Barr et al. (2007) сделали выводы, что апертуры трещин в коллекторе меньше 1 мм, но достигают нескольких мм у протяженных препятствий или выходных отверстий.

Рисунок 3 демонстрирует результаты расчетов с использование формул (1) и (2) с упругими параметрами резервуара Clair ( $V_p = 3110 \text{ м с}^{-1}$ ,  $V_p/V_s = 1.73$ , плотность  $2300 \text{ кг м}^{-3}$ ). Рисунок 3а показывает, что в соответствии с формулой (1) расчетная упругая деформация возрастает с увеличением длины трещин. Рисунок 3б является иллюстрацией расчетов по формуле (2) для двух значений средней апертуры трещин – 1 мм и 5 мм. Черная горизонтальная линия – эффективное давление по нормали к трещине на глубине резервуара Clair. Гидростатическое поровое давление и изотропное эффективное давление учитывались. Рисунок 3б демонстрирует, что все трещины с апертурой в 1 мм и длиной более 40 см будут закрыты на глубине коллектора. Из рисунка 3а видно, что максимальное расчетное значение упругой деформации трещин на месторождении Clair Field составляет примерно  $10^{-11} \text{ мПа}^{-1}$ . Максимальное значение нормальной упругой деформации трещин может быть получено в зависимости от глубины коллектора и средней апертуры трещин. Заметим, что если известно, что коллектор находится под избыточным давлением (зона АВПД), тогда эффективное нормальное давление будет соответственно меньше, а максимальная упругая деформация соответственно больше.

Рассчитанная нормальная упругая деформация для трещин коллектора Clair не означает, что максимальная длина трещин составляет 40 см. Необходимо рассмотреть более реалистичную модель трещиноватости, чем предполагаемая в расчетах по формуле (1). Трещина представляет собой две неровные стыкающиеся поверхности. Имеются области смыкания, между которыми есть открытые области, это показано на рисунке 4. В двумерном пространстве несложно изобразить трещину, разделенную на серии мелких трещин, разделенных точками смыкания, эту модель предложил Muug (2000). В трех измерениях аналогия разделения на более мелкие трещинные пространства менее приемлема. Возможно, разумно было бы считать 40 см средним расстоянием между точками смыкания. В таком случае трещины в коллекторах Clair могут быть и длиной 1 м, и 30 м, но максимальное значение нормальной эффективной деформации не будет превышать  $10^{-11} \text{ м/Па}$ .

Другим случаем разделения на сегменты может быть частичная цементация тем не менее остающихся открытых трещин. Marrett et al. (2007) высказали мнение, что преобладание твердых, изолированных в пространстве “мостиков”, которые не дают трещинам закрываться, часто не принимается во внимание.

### Изометрическая модель пористости

Внимательные читатели уже отметили, что все предыдущие рассуждения касались статической упругой деформации трещин, которая отличается от динамической, испытываемой сейсмическими волнами. Если изолированная трещина заполнена несжимаемым флюидом, это предельно жесткая структура (неупругая).



Рисунок 2 Заполненные кальцитом трещины в платформенных карбонатах в горах Омана (Фотография Dr Mike Searle).

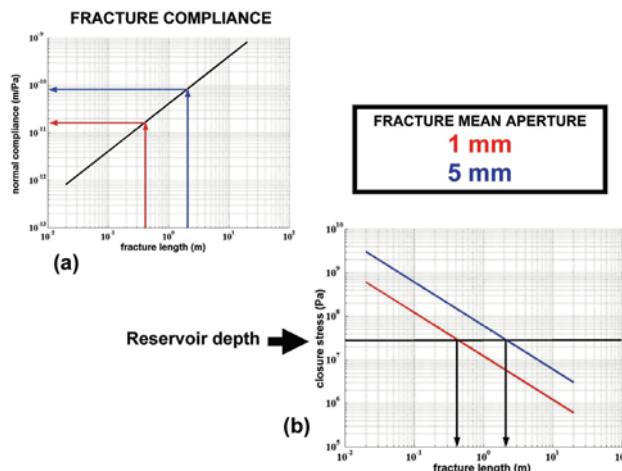


Рисунок 3 (a) Расчетная упругая деформация кольцевой сухой трещины как функция длины трещины; (b) боковое давление закрытия трещины как функция длины трещины.

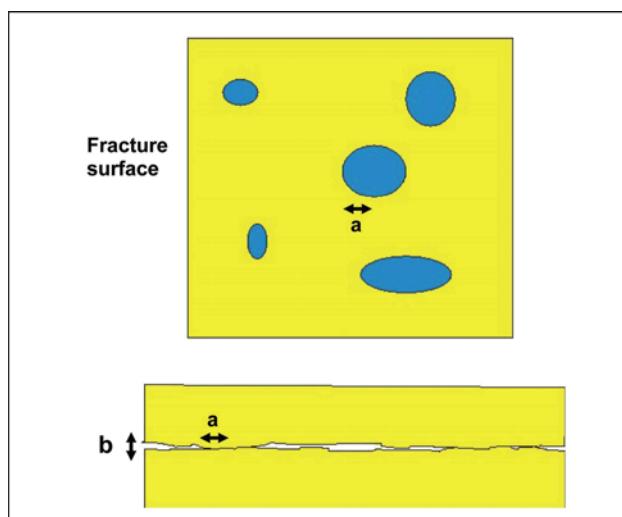


Рисунок 4 Схематическое изображение модели трещины, частично запечатанной контактами поверхностей.

Однако упругая деформация трещин будет увеличиваться, если скелет породы, в котором она находится, одновременно пористый и проницаемый настолько, что флюид может диффундировать из трещин в поры при воздействии нормального давления. Поры гораздо жестче, чем трещины, из-за изометричной формы (ни по одному из измерений размеры принципиально не отличаются).

Сейсмическая волна порождает колебательное поле напряжений. На очень высоких частотах колебания очень быстрые для того, чтобы флюид мог перемещаться между порами (в поры и из пор) скелета породы, поэтому трещиноватость кажется жесткой, неэластичной. На более низких частотах колебания могут быть достаточно медленными, в зависимости от коэффициента диффузии системы, чтобы флюид мог перетекать между порами при каждом колебании. Таким образом, можно ожидать, что упругая деформация будет возрастать с уменьшением частоты. Рисунок 5 демонстрирует такой результат, используя теорию, разработанную Hudson et al. (1996) для эллиптического прожилка в поровой и проницаемой среде, которая представляла изометрическую поровую модель. Заметим, что при высоких частотах прожилок ведут себя как заполненный флюидом. С понижением частоты нормальная упругая деформация стремится к значению, которое получается по формуле (1) выше. Это очень полезный результат. Изометрическая пористая модель это дополнительная сложность, которая может быть проигнорирована, если нам нужно определить только значение максимальной упругой деформации трещиноватости. Допуск на этот эффект будет проявляться только в снижении прогнозируемой максимальной упругой деформации.

### Проблема оценки сдвиговой упругой деформации

Значение сдвиговой упругой деформации  $Z_t$  также требуется для моделирования. Коэффициент прохождения при распространении продольной волны через трещину под любым углом, отличным от прямого по отношению к плоскости падения трещины, будет функцией как нормальной, так и сдвиговой деформации. Если сухую трещину представить как плоское распространение неидеального поверхностного контакта или неровной поверхности, как показано на рисунке 4, тогда

$$\frac{Z_n}{Z_t} = \frac{1 - \nu}{1 - \nu/2} \quad (3)$$

(Sayers and Kachanov, 1995). Поскольку коэффициент Пуассона обычно принимает значения  $0.1 < \nu < 0.25$ , для сухой или заполненной газом трещиноватости ожидается значение  $Z_n/Z_t = 1$ . Если трещина изолирована и заполнена существенно несжимаемым флюидом, она будет сильно устойчивой к давлению по направлению, перпендикулярному к плоскости трещины. В этом случае  $Z_n$  и  $Z_n/Z_t$  будут очень малы, возможно даже близки к нулю. На рисунке 6 показаны лабораторные результаты для искусственных трещин по данным Lubbe et al. (2008). Чёрные значки относятся к разным сухим образцам известняка, или к тем же образцам с меняющейся неровностью поверхности трещин. Незакрашенные значки представляют трещины, заполненные флюидом. Низкое значение  $Z_n/Z_t$  для влажного образца получается из-за очень маленького значения  $Z_n$ . Относительно невелика разница между сдвиговой деформацией сухой и заполненной трещины. Возвращаясь к примеру в нашей статье, будет неверным оценивать максимальные значения нормальной упругой деформации в  $10-11 \text{ мПа}^{-1}$ , выбрав значение  $Z_n/Z_t$  равным 0.01, поскольку трещины влажные,

и допускать максимальные значения сдвиговой деформации в  $10^{-9} \text{ мПа}^{-1}$ . Соответствующее значение  $Z_n/Z_t$  при оценке максимального  $Z_n$  получается, на основании этих лабораторных данных, в пределах 0.3-0.5.

Основным источником неопределенности является масштабирование. Выше обсуждалось, что существует верхний предел нормальной динамической упругой деформации скважин, зависящий от средней апертуры трещин и давления вышележащих пород на глубине коллектора. Можно ли сказать то же самое про динамическую сдвиговую деформацию или  $Z_n/Z_t$  не будет уменьшаться с размерами трещин? Учитывая практически полное отсутствие полевых оценок сдвиговой динамической упругой деформации, стоит принимать во внимание статические данные и любые возможные взаимоотношения между статической и динамической упругой деформацией трещин. Barton (2006) приводит большой обзор и обсуждение этой темы. В целом статическая жесткость сдвига  $K_t$  меньше, чем статическая нормальная жесткость

Рисунок 5 Расчетная упругая деформация круговой трещины в пористой среде с изометрической пористостью как функция частоты.

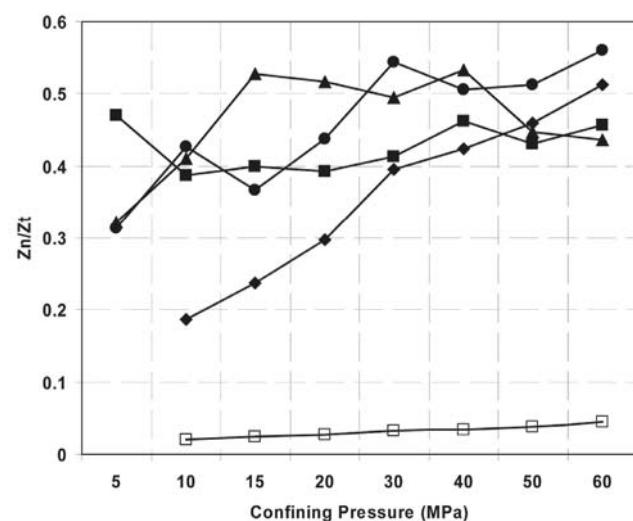
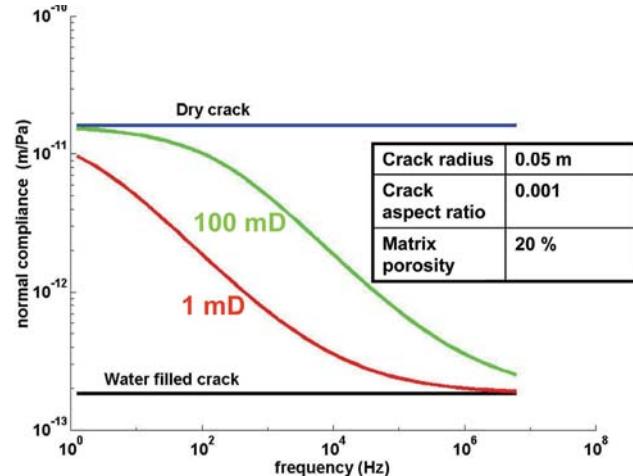


Рисунок 6 Лабораторные оценки отношения нормальной и упругой деформации как функции горного давления (Lubbe et al., 2008). Пояснения в тексте.

Кп. Последняя не зависит существенно от размера блока (масштаба) и связь между опубликованными значениями статической (Кп) и динамической ( $1/Zn$ ) жесткости трещин. Однако, статическая жесткость сдвига существенно уменьшается с размерами блока (Bandis et al., 1981). Barton (2006) показывает, что значения статической жесткости сдвига уменьшаются на два порядка с увеличением размера блока от 100 мм до 10 м. Значения статической жесткости сдвига изменяются от  $10^6$  до  $10^{11}$  Па  $m^{-1}$  (упругие деформации от  $10^{-6}$  до  $10^{-11}$  мПа  $^{-1}$ ) в зависимости и от размера блока, и от нормального давления.

Worthington и Hudson (2000) оценили сдвиговую упругую деформацию главной полуторакилометровой трещинной зоны в южной части Северного моря по амплитуде продольной волны, полученной по данным ВСП (точка 6 на рисунке 1). С применением теории Hudson et al. (1997) было показано, что хотя нормальная упругая деформация водонасыщенной трещинной зоны будет очень маленькой и будет иметь несущественное влияние на амплитуду продольной волны, распространяющейся в трещине или трещинах, сдвиговая деформация теоретически может быть больше и может быть главной причиной наблюдаемого затухания сейсмических волн. Модель, использованная Hudson et al. (1997) показана на рисунке 4. При выборе больших значений радиуса трещины  $a$ , что кажется целесообразным для такой крупной структуры, было получено значение сдвиговой упругой деформации 10-9 м Па $^{-1}$ , что соответствует затуханию сейсмических данных. Эти расчеты подкрепляют точку зрения, что может быть некоторое сходство между  $K_t$  (статическим) и  $1/Z_t$  (динамическим) и что динамическая сдвиговая деформация пропорциональна размеру трещин. Однако, отсутствуют эмпирические данные для подтверждения того, что средняя апертура трещины или относительная площадь трещины или радиус трещины систематически увеличиваются с увеличением размеров трещины. Известно, что амплитуда неровностей трещины приблизительно пропорциональна длине волны неровности (Power et al., 1987), поэтому большие значения радиусов трещины в модели рисунка 4 могут иметь следствием большие значения средней апертуры трещины, которая, как указано выше, совсем не наблюдалась в углеводородных коллекторах. В действительности большинство поверхностей трещин в земле имеют рельефы поверхностей, которые взаимно коррелируются в некоторых масштабах, но не коррелируются в более мелких масштабах. На рисунке 7 видно, что поверхности трещины, кажется, коррелируются, но при длине шкалы примерно 2 см и меньше не коррелируются. Некоррелируемая составляющая рельефа поверхности естественных трещин, или эффективная шероховатость, вообще гораздо меньше, чем фактическая неровность поверхности трещины, поскольку зависит только от некоррелированной малой в масштабе части поверхности трещины (Hillis, 1998). Таким образом, пока полевые измерения не докажут обратное, не стоит ожидать для трещин со средней апертурой 1 мм значений  $Z_t$ , существенно больших средней оценки максимальной нормальной упругой деформации,  $Z_n$ . Возвращаясь обратно к месторождению Clair Field, обнадеживает, что Horne et al. (1998) получили значение 0.31 для отношения нормальной к сдвиговой деформации в результате анализа данных многоазимутных исследований уровня ВСП.

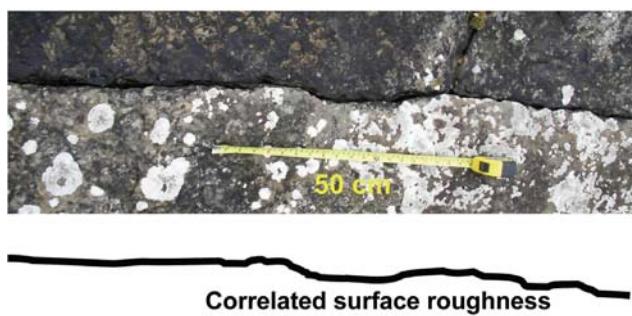


Рисунок 7 Иллюстрация корреляции грубоści поверхности частично залеченной трещины.

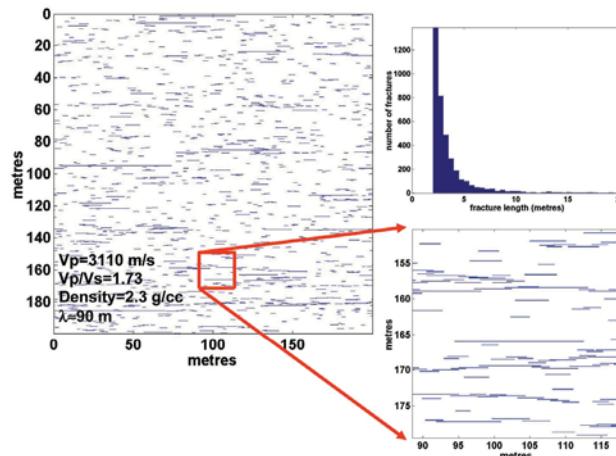


Рисунок 8 Трецинная модель, основанная на статистике по Borgos et al. (2000).

### Трецинная модель коллектора

Приняв окончательное решение о правильных значениях нормальной и сдвиговой деформации для дальнейшего использования, остается только выполнить численное моделирование распространения упругой волны через трецинную модель коллектора, которую следует проверить. Идеально, вычисления должны быть трехмерными. Если есть доказательства существования больше чем одной группы частично открытой трециноватости с разной направленностью, что с большой вероятностью предполагают как Marrett et al. (2007) так и Barton (2007), тогда это должно быть корректно рассчитано. Не существует опубликованной трецинной модели Clair Field. Приведенный ниже пример - двумерный с одной группой параллельных трещин, основанный на работе Borgos et al. (2000). Эти авторы построили статистическую модель распространения трещин, в которой специально учитывается объединение трещин в кластеры. Объединение в кластеры обычно наблюдается в поле как оперяющие группы отрезков трещин. Для модели, изображенной на рисунке 8, принят экспоненциальный закон распределения длин трещин; модель представляет собой комбинацию одиночных трещин и оперяющих групп трещин. Значение параметров, определяющих показатель степени для отдельных трещин и кластеров, пропорциональное отношение одиночных трещин и кластеров и отношение перекрытий и разделений трещин внутри кластеров взяты у Borgos et al. (2000) и основываются на большом количестве полевых наблюдений.

Программа конечных разностей была написана Virieux (1986) и использовалась при моделировании с дополняющими изменениями Coates и Schoenberg (1995), которые позволили включить трещины.

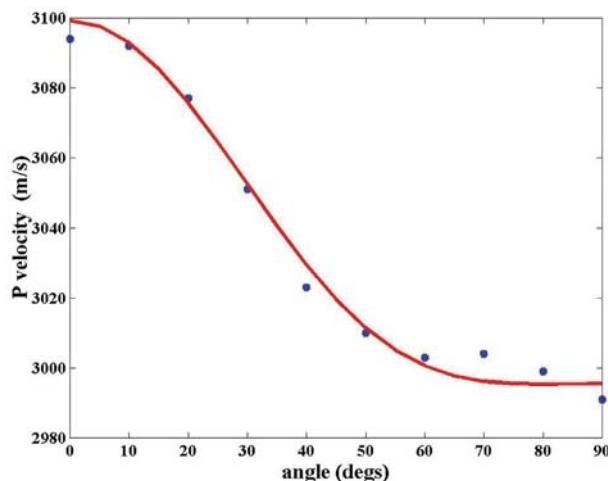


Рисунок 9 Результаты моделирования упругих волн в трещинной модели рисунка 8 (синие точки). Красная кривая рассчитана с использованием эквивалентной теории среды Schoenberg и Sayers (1995).

Упругие деформации всех трещин на рисунке 8 были  $Z_n = 1.0 \times 10^{-11}$  мПа<sup>-1</sup> и  $Z_t = 3.2 \times 10^{-11}$  мПа<sup>-1</sup>, отношение  $Z_n/Z_t$  равно 0.31. На рисунке 9 показаны окончательные продольные скорости как функция от направления внутри модели рисунка 8. Угол  $\alpha = 0^\circ$  определяет направление, параллельное трещинам. Также показана максимально соответствующая кривая, рассчитанная по теории Schoenberg и Sayers (1995). Для расчетов по этой теории в качестве входных параметров для моделирования требуются упругие параметры объемной среды и упругие деформации трещин эквивалентной среды, в единицах Па<sup>-1</sup>. Последние были заданы:  $B_n = 3.5 \times 10^{-12}$  Па<sup>-1</sup> и  $B_t = 1.1 \times 10^{-11}$  Па<sup>-1</sup>, анизотропия продольной волны ( $\epsilon$  – параметр Томсена) равен 0.035 (3.5%). Напоминаем, что это не единственно возможный результат. Это просто ответ на вопрос: Какой может быть минимальная сейсмическая анизотропия, природой которой является трещиноватость, чтобы она могла влиять на проницаемость коллектора и удастся ли ее зарегистрировать? Вероятная не единственность иллюстрируется очень простым расчетом. Упругие деформации трещин эквивалентной среды  $B$ , твердой среды с протяженными, параллельными плоскостями трещин, отстоящие на  $L$  метров

$$B_{n,t} = Z_{n,t}/L. \quad (4)$$

Если плоскости трещин разделены на отдельные трещины с расстоянием  $L$ , задающим среднее расстояние между трещинами в направлении под прямым углом к простирианию трещин, тогда

$$B_{n,t} \approx \eta Z_{n,t}/L,$$

где  $\eta$  неизвестная переменная, которая обозначает сопротивление в эквивалентной среде упругих деформаций, результатом которого является переход от протяженной поверхности трещины к отдельным трещинам.  $\eta$  не изменяется, если просто поменять масштаб модели. Так, если  $L$  и  $Z_{n,t}$  сводятся к произвольной переменной  $N$ , эквивалентная среда упругих деформаций и, следовательно, результирующая сейсмическая анизотропия, также неизменны. Методика, предложенная в этой статье, не устранила эту фундаментальную неопределенность.

## Выходы

Идея, изложенная здесь, состоит в том, что вероятно есть верхний предел упругой деформации трещиноватости коллектора и что этот верхний предел достаточно легко оценить. Значение затем можно использовать для установления верхнего предела анизотропии сейсмических скоростей, которая появляется при любом наборе трещин. Оценки верхнего предела помогают установить уровень достоверности в интерпретации сейсмической анизотропии как показателя присутствия трещиноватости, которая в свою очередь влияет на проницаемость коллектора. Попутный вывод состоит в том, что имеющиеся данные об упругой деформации удручающе неудовлетворительны и необходимы дополнительные полевые исследования для определения как нормальной, так и сдвиговой упругой деформации, если в дальнейшем будет развиваться технология, описанная в этой статье.

Представление о максимальной упругой деформации трещин находится в противоречии с наиболее распространенным представлением о взаимоотношении сейсмической анизотропии со свойствами трещиноватости. В теории эквивалентных упругих сред безразмерный параметр плотности трещин  $\epsilon$  определяется как

$$\epsilon = N \langle a^3 \rangle \quad (6)$$

где  $N$  – количество трещин на единицу объема,  $a$  – радиус трещин. O'Connell и Budiansky (1974) четко разъясняют смысл этого выражения. Они утверждают, что характеристика плотности трещин показывает, что большие трещины снижают коэффициенты сильнее, чем большое количество мелких трещин с такой же общей площадью. Поэтому если маленькие трещины объединяются в меньшее количество более крупных трещин, в результате получим существенное увеличение параметра плотности трещиноватости и соответственное снижение коэффициента упругости среды. Если доводы, представленные в этой статье, и касающиеся определения максимума упругой деформации трещин, верны, тогда это утверждение не повсеместно справедливо. Оно истинно только для трещин или разломов, которые меньше, чем рассчитанная максимальная длина трещин.

Трещины с длиной, большей максимальной (40 см в частном примере, описанном выше), которые непременно будут оставаться открытыми вне точек смыкания или цементирующих перемычек, могут рассматриваться как отдельные трещины или группы меньших трещин, расположенных одна за другой. Упругая деформация трещиноватой породы точно такая же, независимо от формулировки определения. Поэтому наша статья должна закончиться несколько обескураживающим замечанием. Большие трещины играют решающую роль в гидравлической проницаемости, на основе формулы (6). они также делают максимальный вклад в наблюдаемую сейсмическую анизотропию. Это не может быть истиной.

## Благодарности

Я благодарю Patience Cowie за разрешение использовать ее программу для построения трещинных моделей. Также выражаю признательность John McGarry за полезные обсуждения.

## Литература

Bandis, S., Lumsden, A.C. and Barton, N.R. [1981] Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 18, 1-21.

Barr, D., Savory, K.E., Fowler, S.R., Arman, K. and McGarry, J.P. [2007] Pre-development fracture modelling in the Clair field, west of Shetland. In: Lonergan, L., Jolly, R.J.H., Rawnsley, K. and Sanderson, D.J. (Eds.) *Fractured Reservoirs*. Geological Society, London, Special Publication 270, 205-225.

Barton, N. [2006] *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. Taylor and Francis, London.

Barton, N. [2007] Anisotropy and 4D caused by two fracture sets, four compliances, and sheared apertures. *The Leading Edge*, 26, 1112-1117.

Borgos, H.G., Cowie, P.A. and Dawers, N.H. [2000] Practicalities of extrapolating one-dimensional fault and fracture size-frequency distributions to higher-dimensional samples. *Journal of Geophysical Research*, 105, 28377-28391.

Coates, R.T. and Schoenberg, M. [1995] Finite-difference modelling of faults and fractures. *Geophysics*, 60, 1514-1526.

Hardin, E.L., Cheng, C.H., Paillet, F.L. and Mendelson, J.D. [1987] Fracture characterisation by means of attenuation and generation of tube waves in fractured crystalline rock at Mirror Lake, New Hampshire. *Journal of Geophysical Research*, 92, 7989-8006.

Hillis, R.R. [1998] The influence of fracture stiffness and the in situ stress field on the closure of natural fractures. *Petroleum Geoscience*, 4, 57-66.

Horne, S.A., McGarry, J.P., Sayers, C.M., Smith, R.L. and Wijnands, F. [1998] Fractured reservoir characterisation using multi-azimuthal walkaway VSPs. *68<sup>th</sup> SEG Annual Meeting, Expanded Abstracts*, 1640-1643.

Hudson, J.A., Liu, E. and Crampin, S. [1996] The mechanical properties of materials with interconnected cracks and pores. *Geophysical Journal International*, 124, 105-112.

Hudson, J.A., Liu, E. and Crampin, S. [1997] The mean transmission properties of a fault with imperfect facial contact. *Geophysical Journal International*, 129, 720-726.

Lubbe, R. and Worthington, M. H. [2006] A field investigation of fracture compliance. *Geophysical Prospecting*, 54, 319-332.

Lubbe, R., Sothcott, J., Worthington, M.H. and McCann, C. [2008] Laboratory estimates of normal and shear compliance. *Geophysical Prospecting*, 56, 239-248.

Marrett, R., Laubach, S.E. and Olson, J.E. [2007] Anisotropy and beyond: geologic perspectives on geophysical prospecting for natural fractures. *The Leading Edge*, 26, 1106-1111.

Myer, L.R., Hopkins, D., Peterson, J.E. and Cook, N.G.W. [1995]. Seismic wave propagation across multiple fracture. In: Myer, L.R., Cook, N.G.W., Goodman, R.E. and Tsang, C.F. (Eds.) *Fractured and jointed rock masses*. Balkema, Rotterdam, 105-109.

Myer, L.R. [2000] Fractures as collections of cracks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 231-243.

Nelson, R.A. [2001] *Geological Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*. Gulf Professional, Texas.

O'Connell, R.J. and Budiansky, B. [1994] Seismic velocities in dry and saturated cracked solids. *Journal of Geophysical Research*, 79, 5412-5426.

Power, W.L., Tullis, T.E., Brown, S.R., Boitnott, G.N. and Scholz, C.H. [1987] Roughness of natural fault surfaces. *Geophysical Research Letters*, 14, 29-32.

Pyrak-Nolte, L.J., Myer, L.R. and Cook, N.G.W. [1990] Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures. *Journal of Geophysical Research*, 95, 11345-11358.

Sayers, C.M. and Kachanov, M. [1995] Microcrack-induced elastic wave anisotropy of brittle rocks. *Journal of Geophysical Research* 100(B3), 4149-4156.

Schoenberg, M. and Sayers, C.M. [1995] Seismic anisotropy of fractured rock. *Geophysics*, 60, 204-211.

Virieux, J. [1986] P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, 51, 889-901.

Will, R., Archer, R. and Dershowitz, B. [2005] Integration of seismic anisotropy and reservoir-performance data for characterisation of naturally fractured reservoirs using discrete-feature-network models. *SPE 84412*.

Worthington, M.H. and Hudson, J.A. [2000]. Fault properties from seismic Q. *Geophysical Journal International*, 143, 937-944.

Получено 3 апреля 2008; принято 7 мая 2008.