

АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЙ СВЯЗНОСТИ ТРЕЩИН В СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Михаил Александрович Новиков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)330-13-37, e-mail: NovikovMA@ipgg.sbras.ru

Вадим Викторович Лисица

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, тел. (383)330-13-37, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

При прохождении сейсмических волн через трещиновато-пористую среду при наличии в ней флюида возникают потоки, индуцированные этими волнами. Для численного моделирования волновых процессов в пороупругой флюидонасыщенной среде предложена конечно-разностная схема, аппроксимирующая динамическую систему уравнений Био, проведен ряд численных экспериментов, по результатам которых построены зависимости фазовой скорости и затухания волны от частоты.

Ключевые слова: пороупругость, динамические уравнения Био, трещиноватость.

ANALYSIS OF FRACTURE CONNECTIVITY EFFECTS IN SEISMIC WAVEFIELDS ON THE BASE OF NUMERICAL SIMULATION

Mikhail A. Novikov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Junior Researcher, tel. (383)330-13-37, e-mail: NovikovMA@ipgg.sbras.ru

Vadim V. Lisitsa

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, tel. (383)330-13-37, e-mail: LisitsaVV@ipgg.sbras.ru

Seismic wave propagation in fractured-porous media causes the wave-induced fluid flows between fractures and background also between interconnected fractures. This leads to the seismic energy dissipation and thus, the dispersion of waves which depend on the geometry of the fractured space, permeability of fracture filling material, and fluid content. In this paper, we present numerical experiments, confirming the effect of energy dissipation due to the wave-induced fluid flows.

Key words: poroelasticity, dynamic Biot equations, fracturing.

В настоящее время одним из бурно развивающихся направлений вычислительной физики горных пород является анализ диффузионных эффектов при распространении сейсмических и акустических волн в трещиновато-пористых средах [5, 7]. Такие диффузионные процессы связаны с наличием резких кон-

трасов проницаемости между материалом трещин и вмещающей среды. При этом наличие диффузионных перетоков флюида с необходимостью приводит к высоким значениям поглощения сейсмической энергии и, как следствие, к дисперсии. Эффекты, оказываемые диффузионными процессами на волновые поля, существенно зависят от частотного диапазона сигнала, масштабов неоднородностей, их геометрии и физических свойств – в первую очередь проницаемости. Однако современные подходы к численному исследованию таких процессов ограничены анализом решений в квазистатической постановке, т. е. динамические эффекты, такие как рассеяние, в этом случае не учитываются. Основным сдерживающим фактором развития исследований в полной динамической постановке является вычислительная сложность и ресурсоемкость алгоритмов расчета волновых полей для уравнения Био.

В работе приводится численное исследование проявлений связности трещин и их проницаемости в сейсмоакустических волновых полях на основе численного моделирования процессов распространения волн в трещиноватопористой среде. Расчет проводится для широкого диапазона частот (от 500 Гц до 10 кГц), после чего оцениваются скорость распространения волн в среде и поглощение сейсмической энергии в зависимости от частоты. Результаты динамического моделирования сравниваются с оценками, основанными на решении задачи в квазистатической постановке [4, 6], иллюстрируя достаточно высокое совпадение оценок добротности двумя указанными методами. В частности, показано наличие локального повышения затухания сейсмических волн из-за перетока флюида в пересекающихся трещинах.

Для анализа эффектов, оказываемых флюидопотоками на сейсмоакустические волновые поля, проводились серии расчетов для различных геометрий трещиноватого пространства, свойств заполняющего материала и частот зондирующего сигнала. Для всех экспериментов расчеты проводились в ограниченной полосе (рис. 1) с периодическими условиями при $z = 0$ м и $z = 1$ м. Размер расчетной области в горизонтальном направлении менялся в зависимости от частоты зондирующего сигнала. Вмещающая порода – однородная с параметрами: модуль объемного расширения $K = 26$ ГПа, модуль сдвига $\mu = 31$ ГПа, пористость 0.1 и проницаемость $k = 10^{-13}$ м². В модель вводился трещиноватый слой, размер трещин – 30 мм на 4 мм, заполненными материалом с параметрами: модуль объемного расширения $K = 0.02$ ГПа, модуль сдвига $\mu = 0.01$ ГПа, пористость 0.5. Проницаемость трещин изменялась в диапазоне от $k = 10^{-17}$ м² до $k = 10^{-8}$ м². Расчеты проводились с использованием импульса Риккера в качестве зондирующего сигнала, для набора 12 центральных частот от 500 Гц до 10 кГц. В зависимости от частоты выбирались размеры расчетной области – 20 длин волн, толщины трещиноватого слоя – 5 длин волн, расстояния между линиями приема – 10 длин волн (рис. 1).

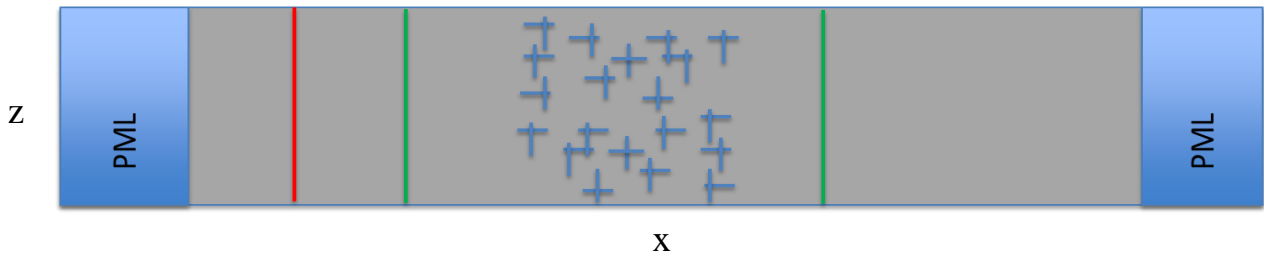


Рис. 1. Схематическое представление расчетной области

Красная линия – положения источников, зеленые – положения приемников

В трещиноватом слое рассматривались четыре типа геометрии трещиноватости: параллельные направлению распространения волны (рис. 2, а), перпендикулярные (рис. 2, б), непересекающиеся трещины с вероятностью 50 % параллельные, 50 % перпендикулярные (рис. 2, в) и пересекающиеся трещины (рис. 2, г). В последнем случае 50 % трещин были параллельны направлению распространения волны, 50 % – перпендикулярны, но каждая трещина имела хотя бы одно пересечение с ортогональной ей трещиной. Общая объемная для трещин в слое – 6.25 %.

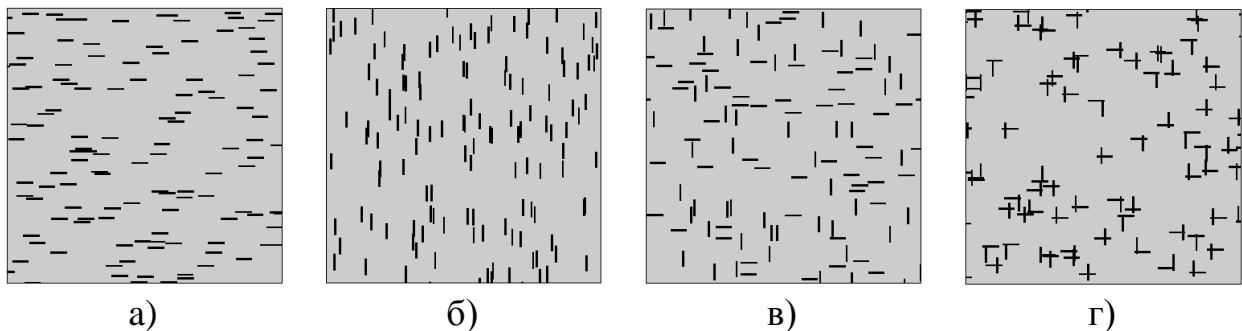


Рис. 2. Геометрия трещин:

- а) параллельные, б) перпендикулярные, в) непересекающиеся,
- г) пересекающиеся

Для описания процессов распространения волновых полей в пороупругой среде использовалась модель Био [2], где для аппроксимации динамической проницаемости вводится параметр извилистости порового пространства [3]. Численное моделирование проводилось с использованием стандартной схемы на сдвинутых сетках со вторым порядком аппроксимации по пространству и по времени [3]. На рис. 3 приводятся примеры зарегистрированных трасс на ближней и дальней линиях приема для фиксированной частоты сигнала для разной геометрии трещин и для всех рассматриваемых проницаемостей.

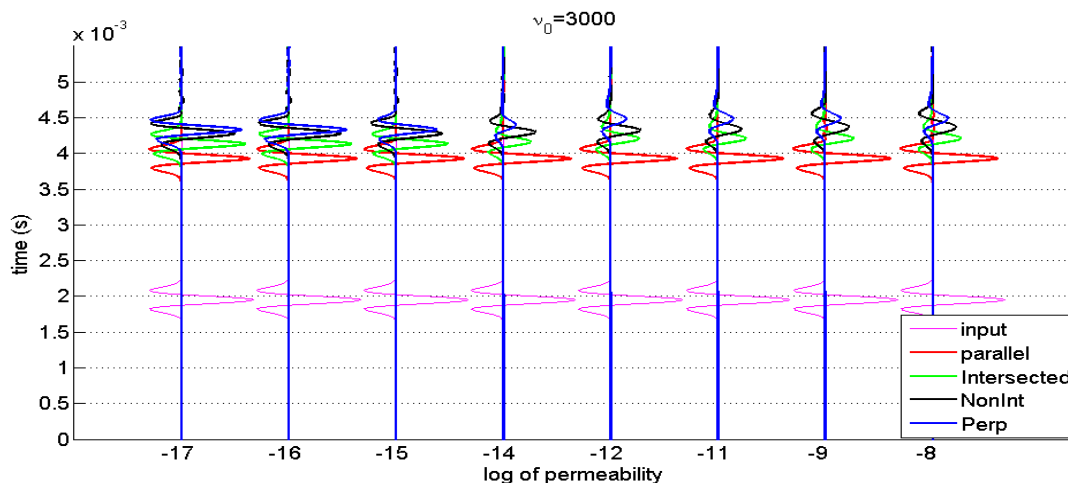


Рис. 3. Сигналы, зарегистрированные на линиях наблюдения для разной геометрии трещин

Розовые линии – сигнал на ближней линии приема, красные – сигнал на дальней линии для системы трещин, параллельной направлению распространения волны, зеленые – пересекающиеся трещины, черные – непересекающиеся трещины, синие – перпендикулярные. По оси X отложены значения проницаемости материала в трещинах

Для оценки скорости распространения волн (в работе рассматривалось только распространение быстрой продольной волны) и поглощения сейсмической энергии применялась сигнальная обработка, основанная на деконволюции зарегистрированных импульсов на линиях наблюдения. Полученные значения поглощения и скорости распространения приведены на рис. 4. В дополнение на рис. 4. приводятся оценки этих параметров, полученные на основе решения задачи нагружения в квазистатической постановке.

Из результатов, приведенных на рис. 4, видно, что при частотах зондирующего сигнала ниже 3 кГц оценки поглощения сейсмической энергии, полученные на основе полного динамического моделирования волновых полей в пороупругих средах и с использованием квазистатического приближения, совпадают с высокой точностью. При этом отчетливо прослеживается локальное повышение поглощения, связанное с перетоком флюида в трещинах. Однако при дальнейшем повышении частоты зондирующего сигнала основным механизмом, контролирующим затухание энергии волны, становится рассеяние, что подтверждается приведенными графиками, основанными на теории однократного рассеяния волн в случайно-неоднородных средах [1]. Важно отметить, что интенсивность рассеяния на пересекающихся и непересекающихся трещинах существенно различается, что также может быть использовано в качестве косвенного признака связности трещин.

Анализ оценок скорости распространения волн в трещиноватых слоях показывает, что квазистатическое моделирование завышает значения эффективной скорости. При этом с уменьшением частоты различие в оценках сокращает-

ся, что может свидетельствовать о снижении ошибки аппроксимации полной модели Био ее квазистатической аппроксимацией.

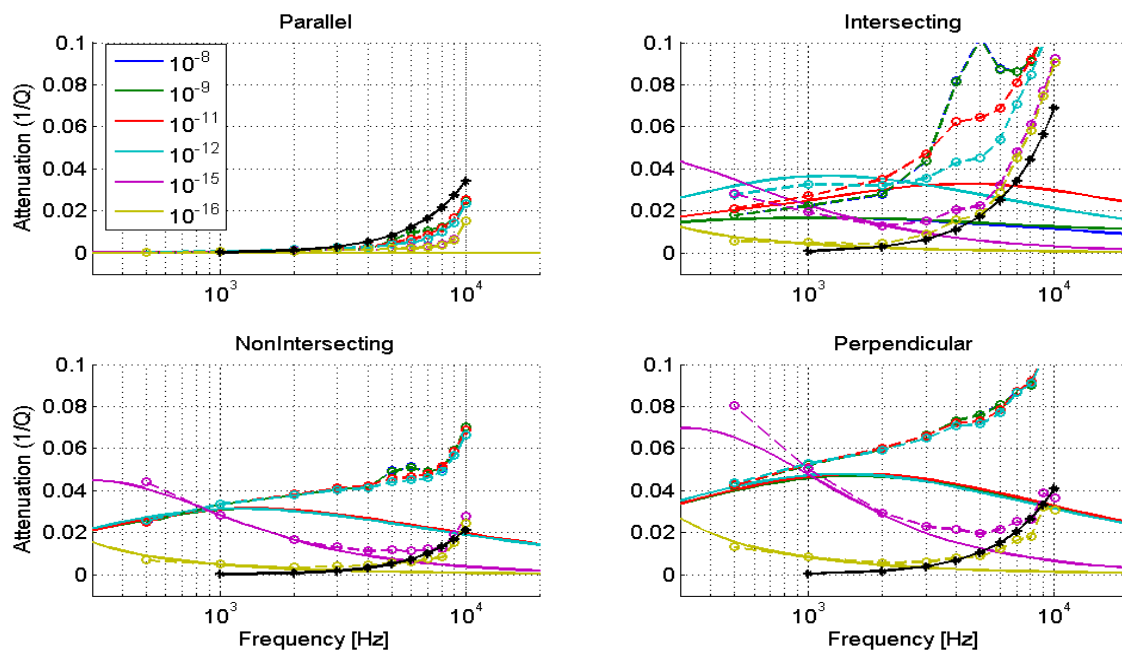


Рис. 4. Зависимость поглощения от частоты для различных значений проницаемости материала трещин

Сплошные линии – результаты квазистатического моделирования, пунктирные линии – динамическое моделирование. Черные линии на графиках поглощения – теоретическая оценка поглощения, связанного с рассеянием

На основе численного моделирования волновых полей в трещиновато-пористых средах показано, что при распространении сейсмических волн в таких средах наличие флюида в высокопроницаемых трещинах приводит к возникновению флюидопотоков, что в свою очередь является причиной поглощения сейсмической энергии. При этом интенсивность затухания и его зависимость от частоты связаны с геометрией трещин, особенно с их связностью. Полученные зависимости могут быть использованы в качестве косвенного признака для определения степени связности трещиноватого пространства, его проницаемости и определения состава заполняющего его флюида.

Работа поддержана грантами РФФИ № 16-05-00800, 17-05-00579, 17-05-00250. Расчеты проводились на кластере НВС-30К Сибирского суперкомпьютерного центра и на кластере «Ломоносов» МГУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть II. Случайные поля. – М.: Наука, 1978.

2. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range // Journal of the Acoustical Society of America. – 1956. – Vol. 28. – P. 168–178.
3. Masson Y.J., Pride S.R. Finite-difference modeling of Biot's poroelastic equations across all frequencies // Geophysics. – 2010. – Vol. 75, N 2. – P. N33–N41.
4. Milani M. et al. Velocity and attenuation characteristics of P-waves in periodically fractured media as inferred from numerical creep and relaxation tests // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014, edited. – 2014. – P. 2882–2887.
5. Quintal B. et al. Sensitivity of S-wave attenuation to the connectivity of fractures in fluid-saturated rocks // Geophysics. – 2014. – Vol. 79, N 5. – P. WB15–WB24.
6. Rubino J.G., Qi Q., Müller T.M. Incorporating capillarity into models for P-wave attenuation and dispersion in partially saturated rocks // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014, edited. – 2014. – P. 2936–2940.
7. Rubino J.G. et al. Seismoacoustic signatures of fracture connectivity // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2014. – Vol. 119, N 3. – P. 2252–2271.

© *М. А. Новиков, В. В. Лисица, 2017*