

# СОПОСТАВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ В ТРЕЩИНОВАТЫХ (ПОРИСТЫХ) ГОРНЫХ ПОРОДАХ

*Ислямова А.А.*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

*В работе рассматриваются некоторые подходы к обнаружению зон трещиноватости горных пород, которые могут служить коллектором трещинного типа, а также оказывать существенное влияние на проектирование разработки месторождения из-за повышенной проницаемости и ориентированности трещин.*

## **Введение**

Сейсморазведка является ведущим методом поиска и разведки залежей углеводородов. Усилия исследователей направлены на получение более точной и достоверной информации о строении и структуре нефтесодержащих интервалов геосреды из сейсмических данных. В настоящее время достаточно уверенно на временных разрезах выделяются стандартные купольные ловушки в осадочных пластах, однако высокие темпы разработки запасов приводят к необходимости обращать все больше внимания на нестандартные типы коллекторов с более сложной структурой.

## **Краткий обзор современных аппаратурно-методических комплексов сейсморазведки**

Одним из путей получения более точной и достоверной информации из данных сейсморазведки является поиск эффективных и оптимальных аппаратурных комплексов для решения различных геологических задач. Очевидны тенденции увеличения детальности наблюдений (использование 3D-сети), регистрации всех компонент и частот сейсмического поля, а также усовершенствования стандартной методики расстановки источников и приемников (ВСП, СЛБО и др.). Получаемая при этом сейсмическая информация может служить для решения специальных геологических задач, в том числе, прогноза фильтрационно-емкостных свойств коллектора.

В частности, схема наблюдений сейсмического локатора бокового обзора (СЛБО), разработанная в 1990–1991 гг. в ГНЦ ВНИИГеосистем (Россия), направлена на выделение энергетически слабых рассеянных волн, являющихся прямым признаком наличия разрывных нарушений и трещиноватости в геологической среде. Расстановка комплекса источников и приемников в данной методике производится на площадках за пределами изучаемой зоны на определенных удалениях. В результате появляется кинематическое разделение отраженных и рассеянных волн, возможность выделения энергетически слабых волн и изучения каждой глубинной точки с разных направлений луча обзора.

Более быстрыми темпами по сравнению с разработкой новых методик наблюдения развивается процесс компьютерной обработки полевой информации. Прогресс в данной области значительно увеличил возможности более полного использования информации, заключенной в сейсмическом волновом поле для расширения круга решаемых геологических задач. Создаются и дополняются программные продукты обработки сейсмических трасс, добавляются новые процедуры обработки как первичных полевых сейсмограмм, так и разрезов после суммирования.

Существует математический аналог описанной выше схемы СЛБО – фокусирующее преобразование, в котором из стандартных полевых данных выбирается система источников и приемников, удовлетворяющая принципу бокового обзора, и проводятся те же процедуры обработки с выделением зон трещиноватости. Другим известным алгоритмом поиска рассеивающих объектов является миграционное преобразование, в основе которого лежит идея подавления поля зеркально-отражающих границ, то есть сейсмических сигналов, связанных с областью первой зоны Френеля. При этом сигналы из остальной части пространства пропускаются практически без подавления, что позволяет выделять на разрезах зоны неоднородностей, приводящие к возникновению рассеянных волн.

Также нельзя обойти вниманием исследования зависимости амплитуды волн от удаления источника – методики обработки AVO (Amplitude Versus Offset). Различные атрибуты AVO-анализа служат для определения азимутальных показателей сейсмической волны, что позволяет достаточно явно выделять в том числе и направление трещиноватости. Кроме того, развиваются и модификации данного метода, например, азимутальный анализ QVO, где изучаются параметры добротности и затухания сейсмического сигнала [1].

### **Характеристика технологий физического моделирования сейсмических волновых полей**

Решение поисково-разведочных задач по данным сейсморазведки невозможно без ясного понимания и количественной оценки влияния тех или иных физико-геологических условий на различные параметры сейсмического поля. Выделение факторов влияния происходит при решении прямой задачи – зная конкретные параметры изучаемого объекта, исследуют атрибуты прошедших через него сейсмических волн, т. е. моделируется процесс распространения волн в среде. Моделирование может выполняться в лаборатории со специальными установками (физическое) или с использованием компьютерных технологий создания моделей и расчета сейсмических полей (математическое).

В физическом моделировании используются как специально созданные образцы из различных материалов, так и подготовленные пробы керна. Однако при таком подходе одной из важнейших задач является соответствие образцов требованиям подобия геологической среде, без которых исследование теряет смысл. Поэтому, исходя из размеров образца, по сравнению с размерами исследуемой геологической области, используются более высокочастотные источники, чем при сейсмических работах, а именно, ультразвуковые и акустические. В результате лабораторных экспериментов измеряются скорости распространения волны, затухание амплитуд, в том числе и в частотной области, а также анизотропия данных свойств, в зависимости от различных петрофизических параметров: пористости, трещиноватости, флюидонасыщенности, термобарических условий.

Изучение литературы, посвященной физическому моделированию распространения сейсмических волн, приводит к публикациям лаборатории прикладной экспериментальной геофизики американского университета Purdue, где вопросом влияния трещиноватости на волну занимаются с 1987 года и опубликовано несколько десятков статей в различных изданиях. Трещины в этих работах рассматриваются как участки разрыва поля смещений, в то время как средние сейсмические напряжения остаются непрерывными, на основании чего вводится понятие удельной жест-

кости трещины как отношение между напряжением и величиной смещений на разрыве сплошности породы.

На основании данных представлений проводятся различные эксперименты. Например, в [2] описан эксперимент с двумя образцами из алюминия: цельным цилиндром и с пропиленными трещинами. В специальной установке, где на одном конце образца закреплен источник колебаний, на другом конце записывается волновой фронт – амплитуда волны в зависимости от времени. Исследуется изменение сейсмических характеристик в зависимости от приложенного давления (рис. 1). Показано, что повышенное давление в цельном образце не приводит к изменениям волнового фронта, в то время как увеличение давления при наличии трещин существенно меняет форму колебаний, амплитуду, частотные характеристики регистрируемой волны. Кроме того, существование системы параллельных трещин приводит к возникновению эффекта волновода, когда большая часть энергии импульса распространяется в центральной зоне образца, при переходе через разрывы энергия тратится, и происходит частотно-зависимое замедление приходящей волны.

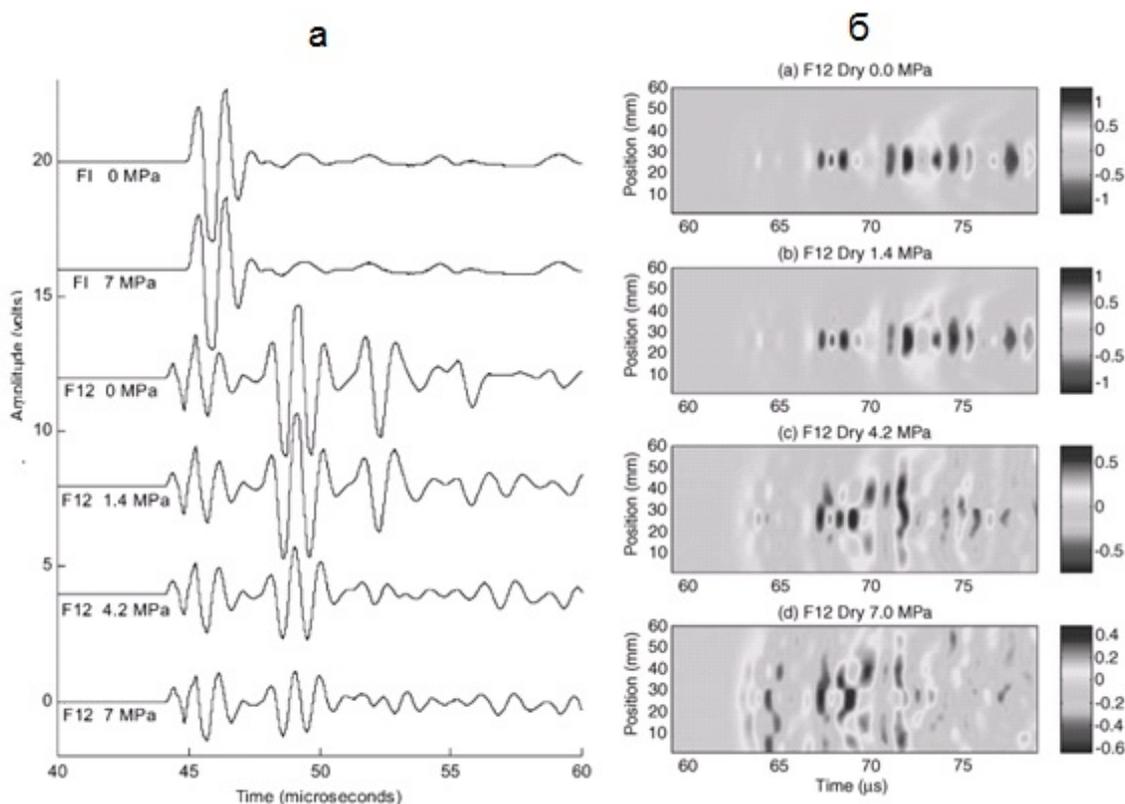


Рис. 1. Запись на приемнике трассы колебаний (а) и волнового фронта (б) при различном давлении, из [2]

Эксперименты проводились и с различными типами насыщения. В [3] сравниваются сухой и водонасыщенный трещиноватый образец, в том числе и под повышенным давлением. Наличие воды в трещинах приводит к уменьшению эффекта волновода в центральной части, т. е. возрастает доля энергии, проходящей через трещины. Повышение давления также ведет к выравниванию волновой картины, на которой практически не заметно наличие неоднородностей в образце. В результате экспериментов получена наглядная картина распространения волны, зарегистрированная специальными колебательными приемниками (рис. 2, слева).

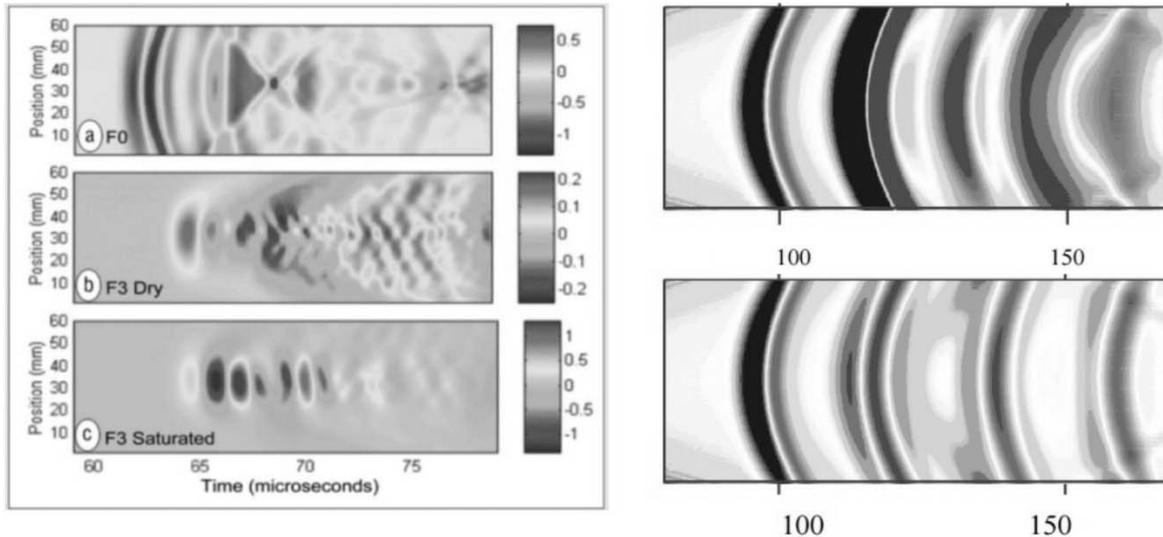


Рис. 2. Слева: временной разрез, полученный в ходе физического эксперимента, из [3]: а) цельный образец, б) трещиноватый сухой образец, с) трещины насыщены водой. Справа: синтетический временной разрез с теми же параметрами: верхняя модель с сухими трещинами, нижняя – в трещинах вода

### Результаты математического моделирования сейсмического волнового поля

Однако есть способ, позволяющий получать подобные результаты без использования лабораторного оборудования – все расчеты могут проводиться с помощью компьютерного моделирования. По описанию образца из работы [3] была создана математическая модель, параметры которой совпадают с физическим экспериментом, и рассчитаны сейсмические поля, прошедшие через систему трещин (рис. 2, справа). Считается полное волновое поле, т. е. присутствуют все типы волн, в том числе и поверхностные неоднородные волны, которые являются одним из малоизученных механизмов передачи энергии в трещиноватых средах. Для случая ненасыщенной модели в обоих экспериментах замечаем отсутствие четкой картины чередования фаз, дифракцию волн на последних интервалах времени. При наличии воды сейсмические поля также сходны: достаточно высокая амплитуда первых вступлений волны, с последующим достаточно резким затуханием; сохранение более высоких значений амплитуд в центральной зоне, по сравнению с существенным уменьшением энергии волны в краевых частях модели.

Лабораторные исследования не везде проводятся на искусственных материалах, в качестве модели может выступать керн, образцы горных пород или шлифы. Интересное исследование описано в [4], где использовано реальное изображение поры в шлифе (рис. 3), заданы упругие свойства содержащихся пород и рассчитана дифракция сейсмического поля для различных частот. Приводятся изображения волнового поля после того, как волна прошла через пору, отразилась от границы модели и вновь прошла через пору, поэтому волновая картина в целом выглядит почти хаотичной (рис. 3, б). По указанным параметрам модели нами было математически рассчитано сейсмическое поле (рис. 3, а). Видно, что в обоих случаях пора насыщена короткопериодными колебаниями (чередование черных и белых тонов на рисунках – это экстремумы волн), берега поры отчетливо «прорисованы» сейсмическим полем.

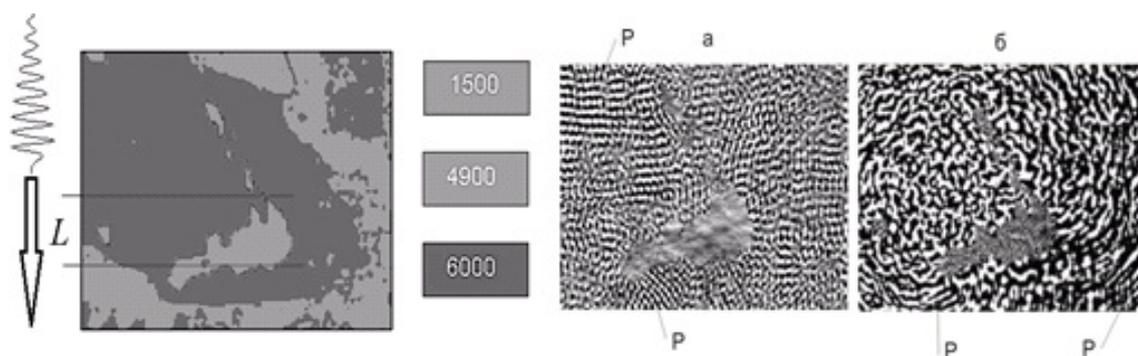


Рис. 3. Матрица скоростей продольных волн в образце, м/с (по работе [4]) и волновая картина после взаимодействия с порой: а – результат расчета автора; б – расчет из [4]

### Заключение

Говоря о математическом моделировании, необходимо заметить, что существует весьма обширный и постоянно пополняющийся арсенал программно-вычислительных средств, позволяющий рассчитывать суммарное волновое поле или его отдельные компоненты для разнообразных сейсмических моделей. В настоящей работе приведены лишь некоторые наши результаты, полученные конечно-разностным методом [5].

### Литература

1. Оболенцева И.Р., Чичина Т.И. 50 лет исследований сейсмической анизотропии в России // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 10. – С. 1452–1470.
2. Xian C., Nolte D. D., Pyrak-Nolte L. J. Compressional waves guided between parallel fractures // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2001. – vol. 38. – № 6. – pp. 765–776.
3. Pyrak-Nolte L. J. Fracture anisotropy: The role of fracture-stiffness gradients // The Leading Edge. – 2007. – vol. 26. – № 9. – pp. 1124–1127.
4. Bagus Endar B. Nurhandoko, Pongga Dikdya Wardaya, John Adler and Kisko R. Siahaan. Seismic wave propagation modeling in porous media for various frequencies: A case study in carbonate rock Citation: AIP Conference Proceedings 1454, 109 (2012); doi: 10.1063/1.4730699
5. Немирович-Данченко М.М., Ислямова А.А. Численное моделирование распространения сейсмических волн в среде, содержащей одиночную пору или пористый слой // Физическая мезомеханика. – 2015. – Т. 18. – № 3. – С. 92–100.