

**ВЕРИФИКАЦИЯ ГРАНИЧНОГО УСЛОВИЯ
НА КРАЮ ТРЕЩИНЫ ГИДРОРАЗРЫВА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЕЕ
ПАРАМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ВСР ТЕХНОЛОГИИ.**

А.В. Деров*, Г.А. Максимов*, М.Ю. Лазарьков**, Б.М. Каштан.**
* *МИФИ, г. Москва*, ** *СПбГУ, г. Санкт Петербург*.

**VERIFICATION OF THE BOUNDARY CONDITION
ON THE HYDROBRAKE EDGE
AT DETERMINATION OF ITS PARAMETERS
ON THE BASIS OF VSP TECHNOLOGY.**

A.V. Derov*, G.A. Maximov*, M.Yu. Lazarkov**, B.M. Kashtan.**
* *MEPhI, Moscow*, ** *SPbSU, Saint Petersburg*.

Аннотация. В докладе рассмотрена задача о возбуждении медленной собственной моды во флюидонаполненной трещине при падении на ее край внешнего акустического или сейсмического поля. Сформулировано эффективное граничное условие смешанного типа, позволяющее в длинноволновом по раскрытию трещины приближении описать генерацию в ней поля давления. Приведены примеры численных расчетов такой генерации с учетом предложенного граничного условия и их сравнение с результатами моделирования по конечно-разностной методике.

Abstract. The problem on fracture size estimation by analysis of generated tube waves under action of external seismic field is considered in the report. The effective boundary condition of the mixed type is formulated in the report for description of the slow fracture mode generation in the long wave approximation by fracture opening.. Examples of numerical calculations of such generation with suggested boundary condition are presented as well as their comparison with the direct modeling by finite-difference method.

Гидроволны, генерируемые и распространяющиеся в скважинах, содержат важную информацию о свойствах окружающей среды и, в частности, о зонах трещиноватости и трещинах, пересекающих скважину. Знание геометрии трещины и ее линейных размеров является критически важным фактором при гидроразрыве пласта. Существует возможность оценить протяженность горизонтальных или наклонных трещин путем использования гидроволн, возбужденных в скважине под действием внешнего сейсмического поля. Если трещина, пересекающая скважину, имеет линейные размеры большие или сравнимые с длиной волны внешней сейсмической волны, то волновое поле во флюиде трещины может быть возбуждено не только в точке пересечения скважины и трещины, но и краями трещины. Эта возможность не рассматривалась в предыдущих исследованиях. Из-за гидравлической связи между трещиной

и скважиной оба эффекта генерируют соответствующие гидроволны в скважине. Если эти волны могут быть зарегистрированы в скважине, то линейные размеры трещины могут быть оценены по временной задержке между этими гидроволнами. Ключевым вопросом в таком подходе является возможность зарегистрировать трубные волны, возникшие от собственной моды, распространяющейся вдоль трещины от ее концов, где она генерируется внешней сейсмической волной.

Таким образом, существует задача о возбуждении внешним сейсмическим полем волн давления в скважине, пересекающей флюидо-заполненную трещину конечного размера.

Малость раскрытия трещины 2δ и радиуса скважины R по сравнению с длиной сейсмической волны позволяют нам написать усредненные по сечению акустические уравнения для динамических величин в скважинном и трещинном флюидах. Этот подход для вывода волнового уравнения в скважине был успешно применен в [1].

С использованием процедуры усреднения, развитой в работах [1,2], можно вывести следующее уравнение для давления в трещине, усредненного по его раскрытию. Уравнение, описывающее распространение медленной моды в трещине в пространственно-временном представлении является псевдодифференциальным волновым уравнением и может быть записано как [2]:

$$\frac{1}{c_f^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \Delta_{\perp} P + H[P - \sigma_{zz}^{\Sigma}] = 0, \quad (1)$$

где P - давление флюида, σ_{zz}^{Σ} - полное нормальное напряжение, приложенное к обоим берегам трещины. ρ_f и c_f - плотность флюида и скорость звука в нем, и для одномерной задачи, оператор $H[P]$, имеет следующее представление [2]:

$$H[P] = \frac{\Delta}{c_s^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(c_V \int_0^t d\tau \int_{-L}^L \frac{dx'}{\pi\delta} P(x', t) \frac{\theta(c_V \tau - |x - x'|)}{\sqrt{(c_V \tau)^2 - (x - x')^2}} \right) \quad (2)$$

Аналогичный результат с несколько другим ядром может быть получен и для общего случая двумерной трещины с произвольной формой периметра.

Выведенное пространственно-временное представление для медленной собственной моды во флюидо-заполненной трещине (1) является аналогом волнового уравнения для гидроволны в скважине [1,3]. Таким образом, чтобы описать волновое поле в системе скважина-трещина под действием внешней сейсмической волны, имеется два волновых

уравнения: 1) для гидроволны и 2) для медленной моды в трещине (1). Для постановки задачи нужно еще сформулировать граничные условия в точке пересечения скважины и трещины и на концах трещины. Первое условие соответствует равенству давлений и массовых потоков в точке пересечения.

Чтобы сформулировать граничное условие на краях трещины, можно использовать смешенное граничное условие, выведенное в [4] для забоя скважины.

$$P + \frac{\rho_0}{\rho_f} \frac{c_l}{i\omega} \frac{\partial P}{\partial x} = -\sigma_{xx}^0 - i\omega\rho_0 c_l u_x^0 \quad (3)$$

Основной эффект, который должен быть проверен в рамках описанного подхода, состоит в корректном описании амплитуды медленной моды в трещине при ее генерации внешним сейсмическим полем на концах трещины. Чтобы сделать такую проверку, была использована программа конечно-разностного моделирования сейсмоакустических полей с цилиндрической симметрией в окрестности скважины. С учетом такой возможности, развитый подход (1) - (3) был адаптирован для цилиндрической геометрии.

Трещина в данном случае представляется как внешность тонкого (толщиной 1 см) заполненного водой слоя между упругими полупространствами, из которого удалена круговая область радиусом 4 м. Края трещины являются прямоугольными. Параметры флюида соответствуют воде $\rho_f = 1$ г/см³, $c_f = 1.5$ км/с, а параметры упругой среды выбраны следующими: $\rho_s = 2$ г/см³, $c_l = 4.5$ км/с, $c_s = 2.5$ км/с. Точечный источник продольных волн расположен на оси симметрии на различных удалениях от плоскости трещины. Источник излучает сферический импульс давления с формой в виде второй производной от гауссовой функции с характерной длительностью, соответствующей частоте 700 Гц. Он соответствует продольной волне с длиной порядка 6 м в окружающей упругой среде. Приемники давления расположены внутри трещины равномерно с шагом 0.5 м.

На рис.1 а) – в) показано сравнение численных расчетов по конечно-разностной программе (черная линия), и по разработанному подходу (красная линия) для различных углов падения внешней сферической волны на край трещины.

Представленное на рис.1 сравнение показывает почти полное совпадение амплитуд и даже профилей сгенерированной медленной собственной моды в трещине. Небольшое различие начинает появляться при малых выносах, когда в данной геометрии начинают играть роль дифракционные эффекты. Выполненная проверка подтверждает

справедливость разработанного подхода и сделанных на его основе выводов.

Работа выполнена при финансовой поддержке CRDF грант RUG2-1669-ST-06.

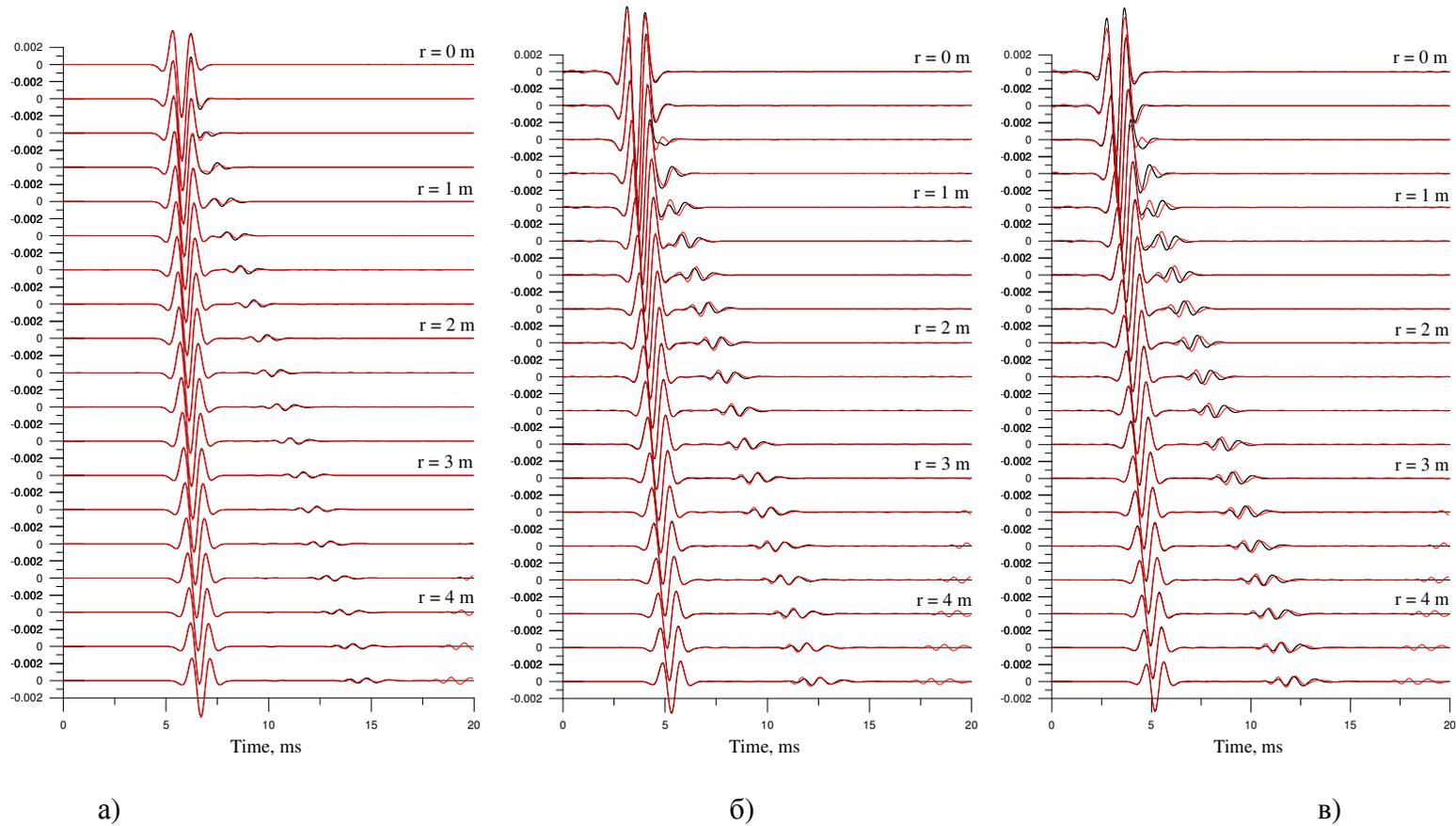


Рис.1. Сравнение численных расчетов поля давления в трещине по конечно-разностной программе (черная линия), и по разработанному подходу (красная линия) для различных углов падения: а) 15° , б) 45° , в) 75° .

Литература.

1. Ionov A.M., Maximov G.A. Propagation of tube waves generated by an external source in layered permeable rocks. // *Geophys. J. Int.* 1996, V.124, N 3, p.888-906.

2. Деров А.В., Максимов Г.А. Трещина гидроразрыва в поле внешней сейсмической волны. // Сб. трудов. XVI Сессия РАО. Т.1 с.324-327. Москва, ГЕОС, 2005г.

3. Деров А.В., Максимов Г.А. Определение ориентации трещин в окрестности скважины методом вертикального сейсмоакустического профилирования. // *Акуст. журн.* 2002, Т.48, №3, с.331-339.

4. Максимов Г.А., Ионов А.М. О граничном условии на дне скважины при моделировании прямых задач вертикального сейсмического профилирования. // *Акуст. журн.* 1998, Т.44, №4, с.510-518.