

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ГИДРОВОЛН ПРИ ВСП ДЛЯ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНЫ  
ГИДРОРАЗРЫВА**

А.В. Деров\*, Г.А. Максимов\*\*,  
Д.В. Александров\*\*\*, М.Ю. Лазарьков\*\*\*, Б.М. Каштан\*\*\*  
(\* МИФИ, г. Москва, \*\* АКИН, Москва, \*\* СПбГУ, г. Санкт Петербург)

**MODELING OF TUBE WAVES AT VSP  
FOR ESTIMATION OF HYDRO FRACTURE PARAMETERS**

A.V. Derov\*, G.A. Maximov\*\*,  
D.V. Alexandrov\*\*\*, M.Yu. Lazarkov\*\*\*, B.M. Kashtan\*\*\*  
(\* MEPhI, Moscow, AKIN, Moscow, \*\* SPbSU, Saint Petersburg)

**Аннотация**

В докладе рассмотрена задача о возбуждении волнового поля в скважине, пересекающей трещину гидроразрыва конечного размера, при падении на нее внешней сейсмической волны при ВСП. Разработана эффективная аналитическая модель как для расчета поля медленной моды трещины, так и полей объемных волн и гидроволн в скважине. Прямое сравнение полей в скважине и трещине, рассчитанных по разработанной методике и на основе конечно-разностного моделирования, показало их хорошее совпадение. Проведенные расчеты показали, что вторичные гидроволны, сгенерированные из-за падения сейсмического поля на край трещины, имеют тот же порядок амплитуд, что и у объемных волн, регистрируемых в скважине при ВСП. Это позволяет использовать эти вторичные гидроволны для оценки размеров трещины гидроразрыва.

**Abstract**

The problem on wave field excitation in a well, intersecting a finite size fracture, under action of external seismic field at VSP is considered in the report. The effective analytical model is developed for calculation of the slow fracture mode and for body and tube waves in a well. The direct comparison of wave fields in a well and in a crack calculated by the developed approach and by the finite-difference code shows their good coincidence. The fulfilled calculations showed that the secondary tube waves, generated due to interaction of the external seismic wave with fracture edge, have the same order of amplitudes as for body waves registered in a well at VSP. It allows us to use the secondary tube waves for estimation of hydrofracture size.

Гидроволны (трубные волны), 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 за счет использования гидроволн, возбужденных в скважине под действием внешнего сейсмического поля. Если трещина, пересекающая скважину,

имеет линейные размеры большие или сравнимые с длиной 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 гидроволны могут быть зарегистрированы в скважине, то линейный размер трещины может быть оценен по временной задержке между этими волнами. Ключевым вопросом в таком подходе является возможность зарегистрировать вторичные гидроволны, возникшие от собственной моды, пришедшей от края трещины, где она генерируется внешней сейсмической волной.

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

Малость раскрытия трещины  $2\delta$  и радиуса скважины  $R$  по сравнению с длиной сейсмической волны позволяют 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 псевдо дифференциальным волновым уравнением и может быть записано в виде [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,  $\sigma_{zz}^{\Sigma}$  - полное нормальное напряжение, приложенное к обоим берегам трещины.  $\rho_f$  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.

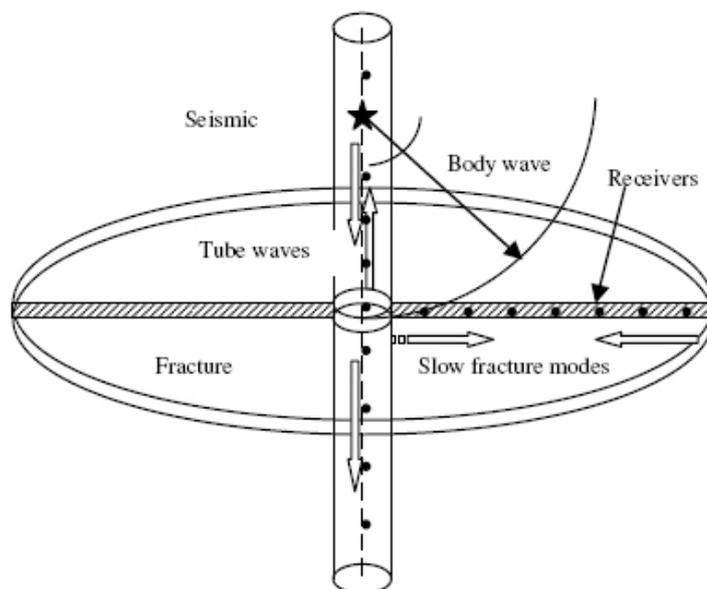
Выведенное пространственно-временное представление для медленной собственной моды во флюидо-заполненной трещине (1) является аналогом волнового уравнения для гидроволны в скважине [1,3]. Таким образом, чтобы описать волновое поле в системе скважина-трещина под действием внешней сейсмической волны, имеется два волновых уравнения: 1) для гидроволны и 2) для медленной моды в трещине (1), и 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.

В качестве граничного условия на краю трещины, можно использовать смешенное граничное условие, выведенное в [4] для забоя скважины.

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

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 сейсмо-акустических полей с цилиндрической симметрией в окрестности скважины. С учетом такой возможности, развитый подход (1) - (3) был адаптирован для цилиндрической геометрии.

Геометрия задачи показана на рис.1. Трещина в данном случае представляется в виде тонкого диска с радиусом 19 м и толщиной 1 см, заполненного водой. Концы края трещины являются прямоугольными. Точечный источник продольных волн расположен в скважине на оси симметрии на удалении 20 м 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 как внутри трещины равномерно с шагом 1 м, так и в скважине равномерно с шагом 2 м.



В докладе приведено сравнение волнового поля в трещине, рассчитанного по конечно-разностной методике и по разработанной аналитической модели. Представленное сравнение показывает почти полное совпадение амплитуд и даже деталей профилей сгенерированной медленной собственной моды в трещине при расчете как по конечно-разностной методике, так и разработанной аналитической модели.

Аналогичное сравнение для волнового поля давления в скважине показывает, что годографы объемных волн, рассчитанные по конечно-разностной методике и по аналитической модели, совпадают, но имеется определенное отличие в их амплитудах, что связано с нарушением геометрического приближения в окрестности скважины, использованного для описания объемных волн в аналитической модели. Гидроволна, которая сгенерирована объемными волнами от источника, упавшими на край трещины, практически совпадает при конечно-разностном и аналитическом расчетах. Амплитуда этой волны оказывается даже большей, чем амплитуды объемных волн, регистрируемых в скважине. Структура этой гидроволны позволяет различать даже вклады от объемных продольной и поперечной волн, которые были ее источником.

Следует отметить, что поскольку регистрация объемных сейсмических волн в скважине является освоеной технологией ВСП, то и регистрация гидроволн с той же и даже большей амплитудой также представляется вполне реалистичной. Оценка именно этого эффекта и являлась основной целью данной работы.

Таким образом, выполненная проверка разработанной аналитической модели для описания волнового поля в скважине, пересекаемой трещиной конечного размера, подтверждает справедливость разработанного подхода и сделанным на его основе выводе о возможности оценки размера трещины

гидроразрыва на основе анализа поля гидроволн, зарегистрированных в скважине.

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

### **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.

\*\*\*\*\*