

01 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В СКВАЖИНЕ, ПЕРЕСЕКАЕМОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА.

Г.А. Максимов, Д.Н. Лесонен
(АКИН, Москва)

WAVE FIELD MODELING IN A WELL, INTERSECTED BY VERTICAL HYDRO FRACTURE

G.A. Maximov, D.N. Lesonen
(AKIN, Moscow)

Аннотация

В докладе рассматривается задача о возбуждении и распространении волновых полей в системе скважина с вертикальной трещиной гидроразрыва при падении на нее внешней сейсмической волны. В отличие от случая горизонтальной или наклонной трещины, которая пересекает скважину в одной точке, вертикальная трещина гидроразрыва пересекает скважину по целому интервалу. Это создает дополнительные трудности уже на этапе постановки такой задачи, не говоря о ее решении. В докладе сформулирована постановка задачи, которая учитывает особенности реализации гидроразрыва в обсаженной скважине, что позволяет рассматривать ее как обобщение разработанной ранее задачи о наклонной трещине. Опираясь на развитый в предыдущих работах авторов подход, в докладе приводятся результаты моделирования волнового поля в скважине с вертикальной трещиной гидроразрыва.

Abstract

The problem on wave field excitation in the system of a well intersected by a hydro-fracture with arbitrary shape under action of external seismic field is considered in the report. In difference from the case of horizontal or inclined fracture, intersecting a well in a point, the vertical hydro fracture intersects a well along whole interval. It creates additional difficulties even at the problem statement as well as for its solution. The problem statement formulated in the report, which takes into account features of hydro fracture in a cased well, allows us to consider this statement as a generalization of the developed early problem for horizontal well. Basing on the approach developed early by the authors, the results of wave field modeling in a well, intersected by vertical hydro fracture, are represented in the report.

Технология гидроразрыва является одним из наиболее эффективных методов интенсификации нефтеотдачи пласта, нашедших в последнее

время широкое применение. Однако применение этой технологии сопряжено с риском пересечения трещиной гидроразрыва водных горизонтов и потерей скважины. Поэтому контроль параметров трещины гидроразрыва (размеров и пространственного положения) является крайне актуальной задачей.

В предыдущих работах авторов [1-3] обосновывается активный метод определения параметров трещины гидроразрыва, основанный на регистрации первичных и вторичных гидроволн в скважине при падении на трещину гидроразрыва внешней сейсмической волны. Вторичные гидроволны являются результатом взаимодействия со скважиной медленной моды, которая генерируется на краю заполненной жидкостью трещины при падении на него внешней сейсмической волны. Время задержки между первичными гидроволнами от точки пересечения скважины и трещины и вторичными гидроволнами от края трещины позволяет оценить линейный размер трещины гидроразрыва.

Ключевым вопросом предыдущих исследований [1-3] был вопрос о возможности регистрации вторичных гидроволн на фоне помех, который сводится к оценке их амплитуды в случае, когда скважина пересекает трещину гидроразрыва в одной точке. Такая оценка предполагает, однако, возможность модельного расчета соответствующих волновых полей, которая, принимая во внимание соотношение между длиной сейсмической волны и другими характерными размерами задачи (радиус скважины, раскрытие и линейный размер трещины, расстояние до источника), недоступна для прямых конечно-разностных расчетов в трехмерной постановке. Тем не менее, на основе эффективных длинноволновых уравнений для поля давления в скважине и трещине, а также эффективных граничных условий на краю трещины [1-3], удалось показать, что амплитуда вторичных гидроволн от края трещины может иметь тот же порядок, что и амплитуда первичных гидроволн от точки пересечения. Данное обстоятельство позволяет рассматривать предлагаемую технологию мониторинга параметров трещины гидроразрыва в качестве вполне реалистичной.

Следует, однако, отметить, что из-за литостатического давления трещины гидроразрыва образуются преимущественно в вертикальной плоскости, вследствие чего возникает конечная область их пересечения с вертикальной скважиной. Данный вариант неоднократно рассматривался в литературе [4-6], однако только для случая внутрискважинного возбуждения полей. Поэтому представляется актуальным обобщение развитого ранее подхода к моделированию

Как и в предыдущих исследованиях, волновое поле давления в скважине P_t описывается неоднородным волновым уравнением [7]

$$\frac{1}{c_{tw}^2} \frac{\partial^2 P_t}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 P_t}{\partial z^2} - \frac{2\rho_f}{E} \frac{\partial^2 \sigma_{eff}^{ext}}{\partial t^2} = \sum_{i=1}^N A_i \delta(z - z_i) \quad (1)$$

Аналогично, поле давления в трещине P_{fr} также описывается неоднородным эффективным волновым уравнением [1-3]

$$\frac{1}{c_f^2} \frac{\partial^2 P_{fr}}{\partial t^2} - \Delta_{\perp} P_{fr} + H[P_{fr} - \sigma_{zz}^{\Sigma}] = \sum_{i=1}^N B_i \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \quad (2)$$

с псевдодифференциальным оператором вида

$$H[P] = \frac{\rho_f}{\delta} \frac{1-v^2}{\pi E} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \int_S d^2 \vec{r}' P(\vec{r}', t) \frac{\delta(c_{eff} t - |\vec{r} - \vec{r}'|)}{|\vec{r}'|}$$

где ρ_f и c_f - плотность флюида и скорость звука в нем, c_{tw} - скорость гидроволны в скважине, через ν и E обозначены коэффициент Пуассона и модуль Юнга упругой среды, а интегрирование ведется по поверхности трещины S с раскрытием δ . Неоднородные слагаемые в (1) и (2) учитывают как наличие внешнего сейсмического поля через эффективные сжимающие напряжения, действующие на скважину σ_{eff}^{ext} и трещину σ_{zz}^{Σ} , так и наличие точечных источников в точках пересечения скважины и трещины (слагаемые с дельта функциями в правых частях уравнений).

Граничные условия в точках пересечения скважины и трещины (z_i, r_i) соответствуют равенству давлений и потоков

$$P_t(z_i) = P_{fr}(r_i), \quad 2\pi R 2\delta \left. \frac{\partial P_{fr}}{\partial r} \right|_{r_i=R} = 2\pi R^2 \left. \frac{\partial P_t}{\partial z} \right|_{z_i-\delta}^{z_i+\delta} \quad (3)$$

Граничные условия на краю трещины были взяты из работы [8]

$$P + \frac{\rho_0}{\rho_f} \frac{c_l}{i\omega} \frac{\partial P}{\partial n} = -\sigma_{nn}^0 - i\omega \rho_0 c_l u_n^0 \quad (4)$$

Неоднородные граничные условия смешанного типа (4) были ранее верифицированы путем сравнения с прямыми конечно-разностными расчетами при возбуждении полей на краю трещины [3,9].

Решение задачи (1) – (4) может быть получено на основе полуаналитического подхода, основанного на приближении Кирхгофа,

учитывающего только однократно отраженные от периметра трещины волны.

В докладе представлены поля давления в трещине и в скважине, регистрируемые системами приемников при нормальном и наклонном падении внешней волны на плоскость трещины.

В заключение еще раз отметим, что прямое конечно-разностное или конечно-элементное моделирование волновых полей для скважины с вертикальной трещиной гидроразрыва в настоящее время практически недоступно из-за принципиально трехмерной геометрии задачи и принципиальной разномасштабности ее структурных элементов. Тем не менее, разработанный эффективный подход позволяет преодолеть указанные трудности.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. 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.
2. Деров А.В. , Максимов Г.А. Возбуждение гидроволн в скважине, пересекаемой трещиной конечного размера, под действием внешней сейсмической волны // Технологии сейсморазведки. 2008, Т.4, стр.60-63.
3. Максимов Г.А., Деров А.В., Каштан Б.М., Лазарьков М.Ю. Определение параметров трещины гидроразрыва на основе анализа поля гидроволн при ВСП. // Акуст. журн. 2011, Т.57, №4, с.521-533.
4. Medlin, W.L., D.P. Schmitt, Fracture diagnostics with tube-wave reflection logs // JPT. 1994. P.239-248.
5. Paige, R.W., L.R., Murray J.D.M. Roberts, Field application of hydraulic impedance testing for fracture measurement: SPE production & Facilities. 1995. P.7-12.
6. Patzek, T.W., A. De. Lossy transmission line model of hydrofractured well dynamics // J. of Petroleum Science and Engineering. 2000. 25. P.59-77.
7. Ionov A.M., Maximov G.A., Propagation of tube waves generated by an external source in layered permeable rocks // Geophys. J. Int. 1996. 124(3). 888-906.
8. Максимов Г.А., Ионоу А.М. О граничном условии на дне скважины при моделировании прямых задач вертикального сейсмического профилирования. // Акуст. журн. 1998, Т.44, №4, с.510-518.
9. Деров А.В. , Лазарьков М.Ю., Максимов Г.А. О граничном условии на краю флюидонаполненной трещины при возбуждении в ней медленной внутренней моды внешним акустическим полем // Сборник трудов XX сессии РАО 27-31 октября 2008 г., Москва. Москва, ГЕОС 2008, Т.1. с.348-350