

Собственные колебания жидкости при гидроударе в скважине, сообщающейся с пластом

Шагапов В.Ш.*, Башмаков Р.А.**

*ИМех УФИЦ РАН, Уфа

**Башкирский государственный университет, Уфа

Явление гидроудара в нефтяных скважинах до недавнего времени рассматривалось лишь с негативной точки зрения, изучались прежде всего его последствия и способы предотвращения. В работе [1] рассмотрены показания датчиков, установленных в нефтяной скважине на различной глубине и фиксирующих изменение давления. Причем вид снятых осциллограмм давления явно указывает, что они соответствуют собственным колебаниям столба жидкости в скважине. В работе [2] изучаются собственные колебания столба жидкости в вертикальной скважине, возникающие при резком закрытии или открытии скважины (гидроударе), распространение возмущений в скважине при остановке нагнетающего насоса. В качестве граничного условия на нижнем конце скважины принималось постоянство давления, что соответствует условию отражения от основной границы для волновой задачи.

Нами рассматривается более детальная картина, учитывающая фильтрационные течения вблизи скважины. Кроме того, рассматриваются собственные частоты при наличии трещин ГРП. Показано, что период колебаний, интенсивность затухания колебаний определяются не только протяженностью столба жидкости в скважине, её диаметром и реологическими свойствами жидкости, но и коллекторскими характеристиками призабойной зоны пласта (в частности, коэффициентами проницаемости, качеством перфорации скважин и свойствами образованных трещин ГРП).

Запишем для жидкости, движущейся в скважине, уравнения сохранения масс и импульсов для возмущений плотности, давления и скорости в линеаризованном приближении:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial w}{\partial z} &= 0, \\ \rho_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} &= -\frac{2\sigma}{a} \quad (0 < z < l), \\ \sigma &= \mu \int_{-\infty}^t \frac{\partial w / \partial \tau}{\sqrt{\pi \nu (t - \tau)}} d\tau, \quad \nu = \frac{\mu}{\rho_0}, \quad \rho = \frac{P}{C^2}. \end{aligned}$$

Здесь σ – касательное напряжение в жидкости на поверхности стенки скважины, μ и ν – динамическая и кинематическая вязкость жидкости, C – скорость звука в жидкости, P – давление, w – скорость жидкости в скважине, a – радиус скважины.

Будем полагать, что на верхней границе течение столба жидкости ограничено неподвижным поршнем. Тогда граничное условие может быть записано в виде $w(t, 0) = 0$.

Пусть $w(l, t) = w_l(t)$, при $z = l$, где l – длина части скважины от поверхности до открытого участка. Тогда на основе закона сохранения массы с учетом однородности давления можем записать

$$\pi a^2 l_p \frac{\partial \rho_p}{\partial t} = \pi a^2 \rho_0 w_l - 2\pi a l_p \rho_0 u_a.$$

Здесь l_p – длина открытого участка скважины, u_a – скорость фильтрации жидкости в окружающей пласт через открытый участок скважины. Необходимо также рассмотреть фильтрационную задачу в пласте:

$$\frac{\partial P'_p}{\partial t} = \alpha_p \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P'_p}{\partial r} \right) \quad (a < r < \infty).$$

В работе ищется решение в виде стоячих волн

$$P = A_p(z) e^{i\omega t}, \quad w = A_p(z) e^{i\omega t}.$$

Получено трансцендентное уравнение для определения комплексных частот ω . Изучена связь между различными параметрами пласта и их влиянием на частоту колебаний, коэффициент затухания, сдвиг по фазе.

Данная задача рассматривается также в случае наличия трещины ГРП.

Список литературы:

- [1] Wang X., Hovem K., Moos D., Quan Y. Water Hammer Effects on Water Injection Well Performance and Longevity // SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, 2008, SPE 112282.
- [2] Ляпидевский В. Ю., Неверов В. В., Кривцов А. М. Математическая модель гидроудара в вертикальной скважине // Сиб. электрон. матем. изв. 2018. № 15. С. 1687–1696.