

УДК 532:536

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ

П.Е. Морозов

Аннотация

В работе получены аналитические выражения передаточной функции для анализа амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик системы «пласт–трещина гидроразрыва». Исследовано влияние объема ствола скважины, проводимости и упругоэластичности трещины на амплитуду давления и сдвиг фаз. В случае высокочастотных возмущений представлены асимптотические формулы, которые могут быть использованы в методе фильтрационных волн давления для определения параметров пласта и трещины.

Ключевые слова: фильтрационные волны давления, гидравлический разрыв пласта, параметры трещины, передаточная функция, амплитудно-частотная характеристика

1. Введение

Метод фильтрационных волн давления основан на зондировании межскважинного пространства периодическими возмущениями [1,2]. В результате работы скважины с дебитом меняющимся по гармоническому закону в ее окрестности устанавливается квазистационарный режим фильтрации, при котором давление в призабойной зоне изменяется с тем же периодом, что и дебит скважины. Обратная задача состоит в определении фильтрационно-емкостных параметров пласта на основе сопоставления теоретических и экспериментальных значений амплитуд изменения давления в скважине и сдвигов фаз при различных частотах воздействия (от 10^{-1} до 10^{-5} Гц) [2]. В работах [1–3] получены аналитические выражения для интерпретации результатов исследований вертикальных скважин методом фильтрационных волн давления в однородных, зонально-однородных и трещиновато-пористых пластах. В работе [4] показано, что логарифмическая производная амплитуды давления в частотной области имеет те же особенности, что и логарифмическая производная давления от времени, которая широко применяется для идентификация режимов течения в пласте. Поэтому методы интерпретации гидродинамических исследований скважин, основанные на анализе производной давления, могут быть использованы в методе фильтрационных волн давления. В данной работе получены аналитические выражения передаточной функции и построены диагностические графики амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик для определения параметров трещины гидравлического разрыва пласта.

2. Передаточная функция

Предположим, что бесконечный однородный пласт постоянной толщины h вскрыт скважиной, пересеченной симметричной вертикальной трещиной. Пласт насыщен слабосжимаемой жидкостью с вязкостью μ , имеет проницаемость k и упругоэластичность β . Трещина считается недеформируемой и имеет полудлину x_f ,

раскрытие w , проницаемость k_f . Течение жидкости в пласте и трещине подчиняется закону Дарси.

Представим дебит скважины в комплексной форме $q(t) = Qe^{i\omega t}$, где Q - амплитуда колебания дебита, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ - круговая частота, T - период. Для комплексной передаточной функции, которая определяется как отношение амплитуды колебания давления к амплитуде колебания дебита, в работе [5] получено выражение:

$$H(i\omega) = [u\bar{p}(u)]_{u=i\omega}, \quad (1)$$

где u - переменная преобразования Лапласа, $\bar{p}(u)$ - изображение по Лапласу функции изменения давления в скважине, работающей с постоянным дебитом Q . Следует отметить, что выражение (1) применимо для различных конфигураций системы «пласт-скважина».

Изображение по Лапласу функции изменения давления в скважине, пересеченной трещиной гидравлического разрыва пласта, находится из решения системы интегральных уравнений [6]:

$$\bar{p}_d(u) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \bar{q}(x', u) K_0(\sqrt{u|x_d - x'|}) dx' - \frac{\pi}{F_{cd}} \int_0^{x_d} \int_0^{x'} \bar{q}(x'', u) dx'' dx' + \frac{\pi x_d}{u F_{cd}}, \quad (2)$$

$$\int_{-1}^1 \bar{q}(x', u) dx' = \frac{1}{u}, \quad (3)$$

где $p_d = \frac{2\pi kh(p_k - p)}{Q\mu}$, $t_d = \frac{kt}{\mu\beta x_f^2}$ - безразмерное давление и время, $F_{cd} = \frac{k_f w}{k x_f}$ - безразмерная проводимость трещины, p_k - пластовое давление, $\bar{q}(x_d, u)$ - изображение по Лапласу притока жидкости к трещине, $x_d = \frac{x}{x_f}$, $K_0(z)$ - модифицированная функция Бесселя второго рода 0-го порядка. В случае $k_f = \infty$ ($F_{cd} = \infty$) система интегральных уравнений (2), (3) описывает приток жидкости к трещине бесконечной проводимости [7].

Таким образом передаточная функция системы «пласт-трещина гидроразрыва» определяется из решения системы интегральных уравнений [5]

$$H(i\omega_d) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 q(x') K_0(\sqrt{i\omega_d|x_d - x'|}) dx' - \frac{\pi}{F_{cd}} \int_0^{x_d} \int_0^{x'} q(x'') dx'' dx' + \frac{\pi x_d}{F_{cd}}, \quad (4)$$

$$\int_{-1}^1 q(x') dx' = 1, \quad (5)$$

где $\omega_d = \frac{\omega\mu\beta x_f^2}{k}$ - безразмерная круговая частота. Для решения системы интегральных уравнений (4), (5) трещина разбивается на $2N$ сегментов с равномерным притоком. В результате получается система линейных алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами, которая с учетом симметрии трещины относительно скважины имеет размерность $(N+1) \times (N+1)$. Из решения системы алгебраических уравнений определяется безразмерная амплитуда давления $A = |H(i\omega_d)|$ и сдвиг фазы $\varphi = \arg H(i\omega_d)$.

Используя асимптотические выражения для линейного и плоскорадиального течения жидкости к трещине бесконечной проводимости [7, 8], были получены приближенные формулы для больших и малых частот [5]:

$$H(i\omega_d) = \frac{\pi}{2\sqrt{i\omega_d}}, (\omega_d \gg 1) \quad (6)$$

$$H(i\omega_d) = -\ln(\sqrt{i\omega_d}) + 2\ln 2 - \gamma, (\omega_d \ll 1) \quad (7)$$

где γ – константа Эйлера. Следует отметить, что аналогичные формулы используются в методе периодического нагрева для определения теплофизических свойств твердых тел и нанесенных на них диэлектрических пленок [9].

На основе асимптотического решения [8] для билинейного режима течения жидкости к трещине конечной проводимости (линейного течения в трещине и плоскопараллельного притока из пласта) получена формула [5]:

$$H(i\omega_d) = \frac{\pi}{\sqrt{2F_{cd}}\sqrt[4]{i\omega_d}}, (\omega_d \gg 1) \quad (8)$$

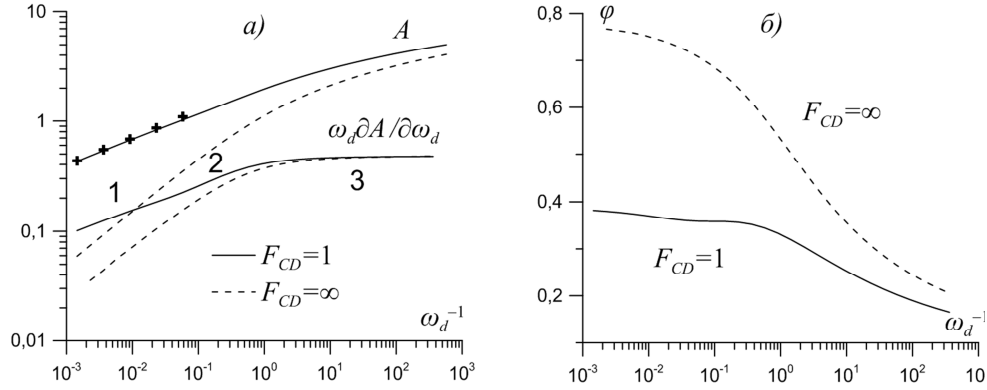


Рис. 1. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристика

На рис. 1 представлены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики для трещины конечной ($F_{cd} = 1$) и бесконечной проводимости ($F_{cd} = \infty$). На графике логарифмической производной амплитуды давления от частоты (рис. 1,а) можно выделить три участка с различными углами наклона, характеризующие билинейный, линейный и радиальный режим притока. Из формул (6) и (8) следует, что с увеличением частоты воздействия сдвиг фаз стремится к $\pi/4$ для трещины бесконечной проводимости и к $\pi/8$ для трещины конечной проводимости (рис. 1,б).

3. Влияние объема ствола скважины

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что при высокочастотных воздействиях значительное влияние на амплитуду давления и сдвиг фаз оказывает сжимаемость флюидов в стволе скважины [3,10]. Выражение для передаточной функции с учетом влияния объема ствола скважины имеет вид [5]:

$$H(i\omega_d) = \frac{i\omega_d \bar{p}_d(i\omega_d)}{1 - C_d \omega_d^2 \bar{p}_d(i\omega_d)}, \quad (9)$$

где $C_d = \frac{C}{2\pi\beta h x_f^2}$, C – коэффициент влияния объема ствола скважины. Асимптотическая формула для билинейного режима течения жидкости к трещине с учетом влияния объема ствола скважины имеет следующий вид [5]:

$$H(i\omega_d) = \frac{\pi}{\sqrt{2F_{cd}}\sqrt[4]{i\omega_d} + \pi C_d i\omega_d}, (\omega_d \gg 1). \quad (10)$$

Из формул (9) и (10) следует, что с увеличением безразмерной частоты ω_d сдвиг фаз стремится к $\pi/2$.

4. Линейный режим течения в трещине

При пуске скважины с трещиной гидроразрыва в работу с постоянным дебитом в начальные моменты времени наблюдается линейный режим течения в трещине, обусловленный упругостью трещины [8,11]. Полуаналитическое решение задачи нестационарного притока жидкости к трещине гидроразрыва с учетом упругости трещины приводится в работе [11]. На основе этого решения и выражения (1) для передаточной функции получена следующая система интегральных уравнений [5]:

$$H(i\omega_d) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 q(x') K_0(\sqrt{i\omega_d|x_d - x'|}) dx', \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \int_{-1}^1 q(x') \left[K_0(\sqrt{i\omega_d|x_d - x'|}) + \frac{\pi}{F_{cd}\sigma} \left(\frac{\cosh(\sigma|x_d - x'|)}{\tanh(\sigma)} - \sinh(\sigma|x_d - x'|) \right) \right] dx' = \\ = \frac{\pi}{F_{cd}\sigma} \left(\frac{\cosh(\sigma x_d)}{\tanh(\sigma)} - \sinh(\sigma|x_d|) \right), \end{aligned} \quad (12)$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{i\omega_d}{\eta_f}}$, $\eta_f = \frac{k_f\beta}{k\beta_f}$, β_f - упругость трещины.

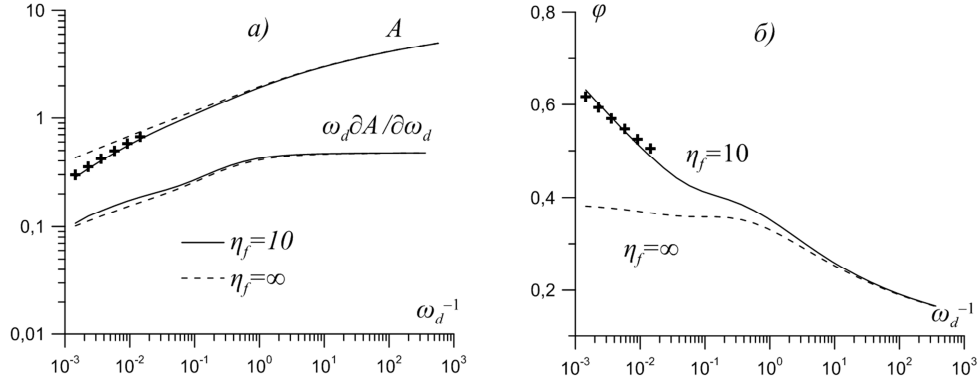


Рис. 2. Амплитудно-частотная (а) и фазочастотная (б) характеристика

Используя асимптотическую формулу для линейного и билинейного режимов течения [8], передаточную функцию представим в виде [5]:

$$H(i\omega_d) = \frac{\pi}{F_{cd} \sqrt{\frac{i\omega_d}{\eta_f} + \frac{2\sqrt{i\omega_d}}{F_{cd}}}}, \quad (\omega_d \gg 1). \quad (13)$$

В работе [12] выражение передаточной функции для линейного и билинейного режимов течения было получено в несколько отличном виде:

$$H(i\omega_d) = \frac{\pi}{F_{cd}} \left(\frac{1}{\sqrt{\xi} \tanh \sqrt{\xi}} \right), \quad (14)$$

где $\xi = \frac{i\omega_d}{\eta_f} + \frac{2\sqrt{i\omega_d}}{F_{cd}}$.

На рис.2 представлены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики с учетом и без учета упругости трещины. Из формул (13) и (14) следует, что для линейного режима течения с ростом частоты сдвиг фаз стремится к $\pi/4$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-00861)

Summary

P.E. Morozov. Determination of hydraulic fracture parameters by filtrational waves method. In this study, new analytical expressions of transfer function are presented for analyzing amplitude- and phase-frequency characteristics of fractured wells. The influence of wellbore storage effect, fracture storage and conductivity on the pressure modulus and phase shift is investigated. In case of high dimensionless frequencies a set of asymptotic solution is derived. These solutions can be used to solve the inverse problems for obtaining the formation and fracture properties. **Key words:** harmonic testing, fractured well, transfer function, phase shift, pressure modulus.

Литература

1. *Молокович Ю.М., Марков А.И., Давлетшин А.А., Куштанова Г.Г.* Пьезометрия окрестности скважин. Теоретические основы. – Казань: ДАС, 2000. – 203 с.
2. *Овчинников М.Н.* Интерпретация результатов исследования пластов методом фильтрационных волн давления. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2003. – 84 с.
3. *Kazi-Aoual M.N., Bonnet G., Jouanna P.* Reconnaissance of saturated porous media by harmonic analysis. I. Direct problem // *Eur. J. Mech. B/Fluids.* -1991. – V. 10, No 1. – P. 51–72.
4. *Hollaender F., Hammond P.S., Gringarten A.C.* Harmonic testing for continuous well and reservoir monitoring // *Proceeding of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 29 Sept.-2 Oct. 2002.*
5. *Morozov P.E.* Harmonic testing of hydraulically fractured wells // *Proceeding of the 17th European Symposium on Improved Oil Recovery, St. Petersburg, Russia, 16-18 April 2013.*
6. *Cinco-Ley H., Meng H.-Z.* Pressure-transient analysis of wells with finite-conductivity vertical fractures in double porosity reservoirs // *Proceeding of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 2-5 Oct. 1988.*
7. *Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.* Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
8. *Cinco-Ley H., Samaniego V.F.* Transient pressure analysis for fractured wells // *Journal of Petroleum Technology.* -1981. – V. 33, No 9. – P. 1749–1766.
9. *Кравчун С.Н., Давитадзе С.Т., Мизина Н.С., Струков Б.А.* Измерение тепловых свойств тонких диэлектрических пленок зондовым методом периодического нагрева. I. Теория метода // *Физика твердого тела.* -1997. –Т.39, № 4. – С. 762–767.
10. *Гаврилов А.Г., Марданишин А.Н., Овчинников М.Н., Штанин А.В.* Исследование окрестности скважины методом высокочастотных фильтрационных волн давления // *Нефтегазовое дело.* -2007. –No 1.– С. 1–10.
11. *Van Kruysdijk C.P.J.W.* Semianalytical modeling of pressure transients in fractured reservoir // *Proceeding of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 2-5 Oct. 1988.*
12. *Hanson J.M.* In-situ fracture characterization - a new approach using multi-frequency flow testing // *Proceedings of the 24th U. S. Symposium on Rock Mechanics, College Station, Texas, 20-23 June 1983.*

Морозов Петр Евгеньевич – к.т.н, с.н.с., ИММ КазНЦ РАН

E-mail: morozov@mail.knc.ru