

УДК 532.546

## ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ В ПОРИСТЫХ И ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

© 2011 г.

П.Е. Морозов

Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН

morozov@mail.knc.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Получено выражение для передаточной функции пласта, связывающее решение задачи квазистационарной фильтрации жидкости к скважине с гармонически меняющимся дебитом и решение задачи нестационарной фильтрации жидкости к скважине с постоянным дебитом. Рассмотрен пример исследования методом фильтрационных волн давления вертикальной скважины в трещиновато-пористом пласте с учетом скин-эффекта и влияния объема ствола скважины.

*Ключевые слова:* трещиновато-пористая среда, фильтрационные волны давления, передаточная функция, гидропрослушивание, скин-эффект, влияния объема ствола скважины.

### Введение

Среди гидродинамических методов исследования скважин и пластов наиболее информативным и помехоустойчивым является метод фильтрационных (гармонических) волн давления (ФВД). Впервые метод ФВД для определения фильтрационных параметров пласта предложили Э.Б. Чекалюк [1], С.Н. Бузинов, И.Д. Умрихин [2]. В дальнейшем метод ФВД получил свое развитие в работах отечественных и зарубежных исследователей [3–8].

### Постановка и метод решения задачи

Рассматривается задача нестационарной фильтрации жидкости к вертикальной скважине, работающей с постоянным дебитом в неограниченном трещиновато-пористом пласте. Предполагается, что движение жидкости происходит по системе трещин. Тогда процесс фильтрации жидкости в трещиновато-пористом пласте описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \psi \frac{\partial p_{1d}}{\partial t_d} &= \frac{1}{r_d} \frac{\partial}{\partial r_d} \left( r_d \frac{\partial p_{1d}}{\partial r_d} \right) + \lambda (p_{2d} - p_{1d}), \\ (1 - \psi) \frac{\partial p_{2d}}{\partial t_d} &= -\lambda (p_{2d} - p_{1d}), \\ 1 \leq r_d < \infty, \quad t_d > 0, \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} p_{1d}(r_d, 0) = p_{2d}(r_d, 0) &= 0, \quad 1 \leq r_d < \infty, \\ p_{1d}(\infty, t_d) = p_{2d}(\infty, t_d) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\left( r_d \frac{\partial p_{1d}}{\partial r_d} \right)_{r_d=1} = -1 + C_d \frac{\partial p_{wd}}{\partial t_d}, \quad (3)$$

$$p_{wd} = \left[ p_{1d} - S \left( r_d \frac{\partial p_{1d}}{\partial r_d} \right) \right]_{r_d=1},$$

где

$$p_d = \frac{2\pi kh(p - p_k)}{\mu q}, \quad t_d = \frac{kt}{\mu(\beta_1 + \beta_2)r_c^2},$$

$$r_d = \frac{r}{r_c}, \quad \psi = \frac{\beta_1}{\beta_1 + \beta_2}, \quad \lambda = \frac{\alpha r_c^2}{k},$$

$$C_d = \frac{C}{2\pi(\beta_1 + \beta_2)hr_c^2},$$

$p$  – давление,  $\beta$  – упругоємкость (индекс 1 соответствует трещинам, 2 – пористым блокам),  $k$  – проницаемость трещин,  $\mu$  – вязкость,  $\alpha$  – параметр перетока,  $h$  – толщина пласта,  $q$  – дебит,  $C$  – коэффициент влияния объема ствола скважины,  $S$  – скин-эффект,  $r_c$  – радиус скважины,  $p_k$  – пластовое давление,  $p_w$  – забойное давление. Решение задачи в изображениях по Лапласу имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{wd}(u) &= \frac{K_0(\sqrt{uf(u)}) + S}{u + C_d u^2 [K_0(\sqrt{uf(u)}) + S]}, \\ f(u) &= \frac{\lambda + \psi(1 - \psi)u}{\lambda + (1 - \psi)u}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $u$  – переменная преобразования Лапласа,  $K_0(z)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода 0-го порядка. Оригинал функции  $\bar{p}_{wd}(u)$  на-

ходится численно. Для пористого пласта  $\psi = 1$ ,  $f(u) = 1$ .

Пусть дебит скважины меняется по гармоническому закону. В результате достаточно продолжительной работы скважины с гармонически меняющимся дебитом в окрестности скважины устанавливается квазистационарный режим фильтрации, при котором давление в скважине и в пласте изменяется со временем с той же частотой, что и дебит, но с отличной амплитудой и сдвигом фаз. Представим дебит скважины в комплексной форме  $q(t) = Q_A e^{i\omega t}$ , где  $Q_A$  – амплитуда колебания дебита,  $\omega = 2\pi/T$  – частота,  $T$  – период колебания. С помощью интеграла Дюамеля в [7] установлено, что комплексная передаточная функция  $H(i\omega) = P_A/Q_A$  является преобразованием Фурье функции импульса давления. В настоящем исследовании с использованием связи преобразования Фурье с двусторонним преобразованием Лапласа и с учетом того, что  $p_d = 0$  при  $t_d \leq 0$ , для комплексной передаточной функции получено соотношение:

$$H(i\omega_d) = [u\bar{p}_{wd}(u)]_{u=i\omega_d},$$

$$\omega_d = \frac{\omega\mu(\beta_1 + \beta_2)r_c^2}{k}. \quad (5)$$

Очевидно, что амплитуда давления  $A = |H(i\omega_d)|$  и сдвиг фазы  $\varphi = \arg H(i\omega_d)$  зависят от частоты колебания дебита, коэффициента влияния объема ствола скважины и фильтрационных параметров пласта, в том числе скин-эффекта. При этом графики производной амплитуды давления от периода воздействия имеют те же особенности, что и диагностические графики производной давления от времени, которые используются при интерпретации результатов гидродинамических исследований скважин [7].

### Анализ результатов

На рис. 1 представлены графики безразмерного давления и логарифмической производной давления от времени, а также амплитуды давления и логарифмической производной амплитуды давления от периода воздействия. На малых временах (периодах воздействия) в билигарифмических координатах все графики имеют единичный наклон, обусловленный сжимаемостью флюидов в стволе скважины. Переток жидкости из пористых блоков в трещины отражается на графиках производной давления и амплитуды давления в виде «оврага». На больших временах графики производной давления и амплитуды давления параллельны оси абсцисс.

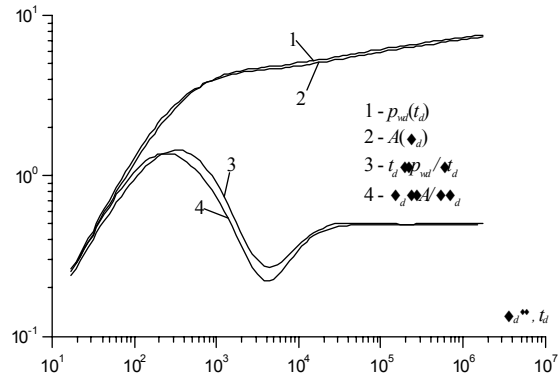


Рис. 1

### Заключение

Получено новое решение задачи квазистационарной фильтрации жидкости в трещиновато-пористом пласте, учитывающее влияние объема ствола скважины и скин-эффект.

Полученное выражение для комплексной передаточной функции может быть использовано при исследовании методом ФВД композитных и слоистых пластов, несовершенных вертикальных скважин, горизонтальных скважин, трещин гидравлического разрыва пласта.

### Список литературы

1. Чекалюк Э.Б. Основы пьезометрии залежей нефти и газа. Киев: Гос. изд-во техн. лит-ры УССР, 1961. 286 с.
2. Бузинов С.Н., Умрихин И.Д. Исследование пластов и скважин при упругом режиме фильтрации. М.: Недра, 1964. 242 с.
3. Желтов Ю.П., Кутляров В.С. О неустановившемся движении жидкости в трещиновато-пористом пласте при периодическом изменении давления на его границе // ПМТФ. 1965. №6. С. 69–76.
4. Kuo С.Н. Determination of reservoir properties from sinusoidal and multirate flow test in one or more wells // SPE J. 1972. Vol. 12, No 6. P. 499–507.
5. Щелкачев В.Н. Развитие фундаментальных решений теории нестационарного поля и их применение в теории фильтрации // Изв. вузов. Нефть и газ. 1985. №10. С. 47–53.
6. Молокович Ю.М. и др. Выработка трещиновато-пористого коллектора нестационарным дренированием. Казань: Изд-во «РегентЪ», 2000. 156 с.
7. Hollaender F., Hammond P.S., Gringarten A.C. Harmonic testing for continuous well and reservoir monitoring // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, 29 Sept.–2 Oct. 2002. P. 1–12.
8. Овчинников М.Н. Интерпретация результатов исследования пластов методом фильтрационных волн давления. Казань: ЗАО «Новое знание», 2003. 83 с.

**SEEPAGE PRESSURE WAVES IN POROUS AND FRACTURED POROUS MEDIA***P.E. Morozov*

A expression for the transfer function of the reservoir, connecting the solution of the quasi-steady fluid flow to a well with a harmonically varying flow rate and the solution of unsteady fluid flow to a well with a constant flow rate was obtained. An example of the investigation of seepage pressure waves of vertical wells in fractured porous reservoir, taking into account skin-effect and wellbore storage effect is given.

*Keywords:* fractured-porous medium, seepage pressure wave, transfer function, interference, skin-effect, wellbore storage effect.