



УДК 532.546

# ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТЕЙ В УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ЗАКОНОМ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД

*Б. Х. Хужаёров, И. Э. Шодмонов, Э. Ч. Холиёров*

Академия наук Узбекистана, Самарканд

**Аннотация.** Как показывает опыт разработки глубоких нефтяных месторождений с терригенными коллекторами наряду с необратимостью деформации происходит потеря устойчивости скелета породы пласта, т.е. он разрушается в зонах сильного понижения давления. Частицы породы затем выносятся из пласта потоком жидкости. При этом состав жидкости изменяются, образуется двухфазная среда, состоящая из жидкости и твердых частиц. В данной работе предложены обобщенные зависимости изменения пористости и проницаемости в упруго-пластическом режиме фильтрации жидкости с учетом выноса разрушенных частиц из пласта, где учитывается нелокальный характер выноса разрушенных частиц во времени.

**Ключевые слова:** фильтрация, закон Дарси, коллектор, разрушение, устойчивость

---

Теория упруго-пластической фильтрации жидкостей была разработана в работе Г. И. Баренблатта, А. П. Крылова. (1955) [1]. Применение и развитие эта теория получила в монографии А. Т. Горбунова (1981)[2], а модель упруго-пластической фильтрации с учетом разрушения пласта дана в [3]. Изменение коэффициентов проницаемости и пористости в зависимости от давления запишется в виде:

$$\begin{aligned} \downarrow k &= k_0 \exp(-a_{k0}(p_0 - p)) + \theta(p_s - p)k_s \times \\ &\quad \times \int_0^{t-t_s(x)} (p_s - p) \exp(-c_k(t - t_s(x) - \xi)) d\xi, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \downarrow m &= m_0 \exp(-\beta_{m0}(p_0 - p)) + \theta(p_s - p)m_s \times \\ &\quad \times \int_0^{t-t_s(x)} (p_s - p) \exp(-c_m(t - t_s(x) - \xi)) d\xi, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \uparrow k &= k_0 \exp(-(a_{k0} - a_{k1})(p_0 - p_1)) \exp(-a_{k1}(p_0 - p)) + \\ &\quad + \theta(p_s - p_1)k_s \int_0^T (p_s - p_1) \exp(-c_k(t - t_s(x) - \xi)) d\xi, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \uparrow m &= m_0 \exp(-(\beta_{m0} - \beta_{m1})(p_0 - p_1)) \exp(-\beta_{m1}(p_0 - p)) + \\ &\quad + \theta(p_s - p_1)m_s \int_0^T (p_s - p_1) \exp(-c_m(t - t_s(x) - \xi)) d\xi, \end{aligned}$$

где  $\downarrow, \uparrow$  — соответствуют процессу понижения и восстановления давления;  $k_0, m_0$  — первоначальные значения проницаемости и пористости соответственно (при давлении  $p = p_0 = \text{const}$ );  $a_{k0}, \beta_{m0}$  — соответственно коэффициенты изменения проницаемости и пористости;  $p_0, p$  — начальное и текущее давление;  $p_s$  — давление, при котором происходит нарушение целостности пласта;  $\theta(x)$  — единичная функция Хевисайда;  $t$  — время;  $t_s(x)$  — начальное время когда  $\theta(x) = 1$ ;  $k_s, c_k, m_s, c_m$  — коэффициенты, учитывающие косвенным образом прочностные свойства пород;  $a_{k1} = a_{k0} \exp(-\eta_k(p_0 - p_1)), \beta_{m1} = \beta_{m0} \exp(-\eta_m(p_0 - p_1)), p_0 \geq p_1, \eta_m, \eta_k$  — коэффициенты необратимого изменения пористости и проницаемости;  $p_1$  — распределение давления в конце фазы понижения.

Используя (1) и (2), уравнение неразрывности и закон Дарси получены следующие уравнения фильтрации в одномерном случае

$$\begin{aligned} \downarrow \frac{\partial}{\partial t} &\left[ \varphi + \frac{m_s \theta(\sigma(\varphi))}{m_0} \varphi^{\frac{\beta_{m0}}{\beta}} \int_0^{t-t_s(x)} \sigma(\varphi) \exp(-c_m(t - t_s(x) - \xi)) d\xi \right] = \\ &= \chi_1 \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left[ \varphi^{\gamma-1} + \frac{k_s \theta(\sigma(\varphi))}{k_0} \varphi^{-\frac{a_{k0} + \beta_{m0}}{\beta}} \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \int_0^{t-t_s(x)} \sigma(\varphi) \exp(-c_k(t - t_s(x) - \xi)) d\xi \right] \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \uparrow \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \exp [-\varphi_2(x)] \exp [-\psi_2(x)(p_0-p)] + \xi_2(x) \exp (-\beta_{ж}(p_0-p)) \right\} = \\ & = \chi_2 \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left[ \exp [-\varphi_1(x)] \exp [-\psi_1(x)(p_0-p)] + \right. \right. \\ & \left. \left. + \xi_1(x) \exp [-(\beta_{ж}-a_{\mu})(p_0-p)] \right] \frac{\partial p}{\partial x} \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $x$  — линейная координата;  $\varphi = \exp(-\beta(p_0-p))$ ,  $\varphi(T, x) = \exp(-\beta(p_0-p_1)) = \psi(x)$ ,  $\beta = \beta_{m0} + \beta_{ж}$ ,  $\beta_{ж}$  — коэффициент сжимаемости пор;  $a_{\mu}$  — коэффициент изменения вязкости;  $\gamma = \alpha/\beta$ ,  $\alpha = a_{k0} + \beta_{ж} - a_{\mu}$ ,  $\mu_0$  — вязкость при  $p = p_0$ ,  $\sigma(\varphi) = p_s - p_0 - (1/\beta) \ln \varphi$ ,

$$\xi_1(x) = \frac{k_s}{k_0} \theta(p_s - p_1) \int_0^T (p_s - p_1) \exp(-c_k(t - t_s(x) - \xi)) d\xi,$$

$$\chi_1 = \frac{k_0}{\mu_0 m_0 \beta},$$

$$\xi_2(x) = \frac{m_{s0}}{m_0} \theta(p_s - p_1) \int_0^T (p_s - p_1) \exp(-c_m(t - t_s(x) - \xi)) d\xi,$$

$$\chi_2 = \frac{k_0}{\mu_0 m_0},$$

$$\varphi_1(x) = a_{k0} \left[ 1 - \psi_1(x)^{\eta_k/\beta} \right] \cdot \left[ -\frac{1}{\beta} \ln |\psi(x)| \right],$$

$$\varphi_2(x) = \beta_{m0} \left[ 1 - \psi(x)^{\eta_m/\beta} \right] \cdot \left[ -\frac{1}{\beta} \ln |\psi(x)| \right],$$

$$\psi_1(x) = \beta_{ж} - a_{\mu} + a_{k0} \psi(x)^{\eta_k/\beta}, \quad \psi_2(x) = \beta_{ж} + \beta_{m0} \psi(x)^{\eta_m/\beta},$$

$T$  — максимальное время в конце режима понижения давления.

На основе модели (3), (4) рассмотрена задача фильтрации в конечном ( $0 \leq x \leq L$ ), закрытом, одномерном пласте. В конце пласта  $x = L$  поток жидкости отсутствует, а в точке  $x = 0$  задается скорость фильтрации. Первоначально в пласте было постоянное давление  $p_0$ . В этом случае начальное и граничные условия в режиме понижения давления относительно  $\varphi$  имеют вид:

$$\varphi(0, x) = 1, \quad \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \lambda \varphi^{(\beta-\alpha)/\beta} \right) \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial \varphi(t, L)}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

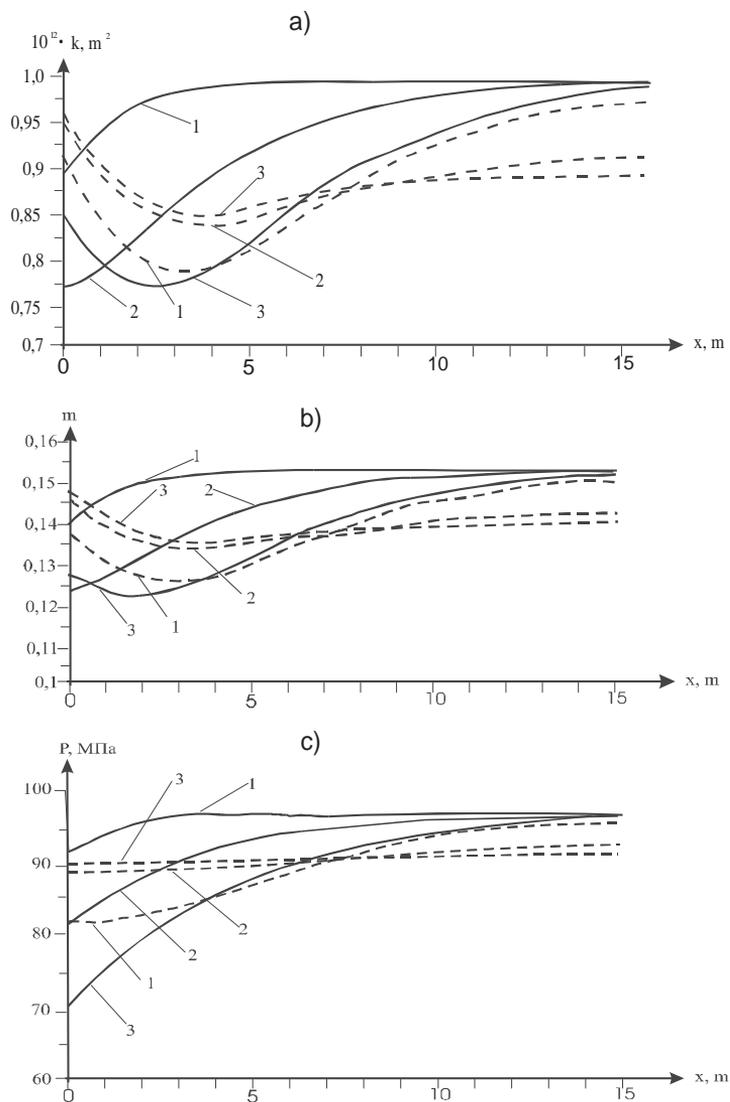


Рис. 1: Распределение  $k$ (a),  $m$ (b),  $p$ (c) в режиме понижения (—) при  $t = 500$  (1), 4000 (2), 8000 (3) с и восстановления (-----) давления при  $t = 1000$  (1), 7000 (2), 13000 (3) с,  $k_0 = 10^{-12} \text{ м}^2$ ,  $k_s = 0,6 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/(\text{МПа} \cdot \text{с})$ ,  $m_0 = 0,15$ ,  $m_s = 10^{-7} (\text{МПа} \cdot \text{с})^{-1}$ ,  $c_k = 4 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ,  $c_m = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ ,  $p_0 = 100 \text{ МПа}$ ,  $p_s = 90 \text{ МПа}$ ,  $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$ ,  $a_\mu = 0,0005 \text{ МПа}^{-1}$ ,  $\mu = 2,0 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $w_0 = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ ,  $a_\mu = 5 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$ ,  $\beta_{\text{ж}} = 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}$ ,  $a_{k0} = 0,02 \text{ МПа}^{-1}$ ,  $\beta_{m0} = 0,015 \text{ МПа}^{-1}$ ,  $\eta_k = 0,03 \text{ МПа}^{-1}$ ,  $\eta_m = 0,02 \text{ МПа}^{-1}$

где  $\lambda = \frac{\beta q_0 \mu_0}{k_0 \rho_0}$ ,  $q_0$  — массовый расход на единицу площади поперечного сечения пласта ( $\rho w_0$ ).

В режиме восстановления давления начальное и граничные условия относительно  $p$  следующие:

$$p(0, x) = p_1(x), \quad \frac{\partial p(t, 0)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p(t, L)}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Уравнения (3), (4) при соответствующих условиях (5), (6) решены численно и оценено влияние разрушения пород на фильтрационные показатели. Некоторые результаты показаны на Рис. 1. Установлено, что когда разрушение и вынос частиц учитывается в виде интегральной зависимости (1), (2) в фильтрационных показателях наблюдается нелокальные во времени изменения. Численные расчеты показывают, что зона изменения  $k$  и  $m$  прогрессирует даже в режиме восстановления  $p$ , что не наблюдается в открытых пластах. Необратимые изменения  $k$ ,  $m$  существенны, что приводят к значительному изменению всех других фильтрационных характеристик. В зоне разрушения за счет выноса частиц  $k$  и  $m$  увеличиваются, что приводит к немонотонным профилям как в режиме понижения, так и восстановления давления (Рис. 1). Результаты показывают, что влияния пластической деформации и выноса разрушенных частиц на профили  $k$  и  $m$  взаимнообратны.

## Список литературы

- [1] Баренблатт Г. И., Крылов А. П. Об упруго–пластическом режиме фильтрации // Изв. АН СССР. ОН. 1955. № 2. С. 5–13.
- [2] Горбунов А. Т. Разработка аномальных нефтяных месторождений. М.: Недра, 1981. 237 с.
- [3] Khuzhayorov B. Kh. Elastico-plastical filtration with taking into consideration the destruction of the bed // 3-rd European Fluid Mechanics Conference. 1997. Book of abstracts. Gettingen. Germany. 15-18 Sept. P. 181.