

Эффект вытеснения жидкости скелетом при малой пористости<sup>1</sup>

Филиппов А.И.

\*Институт стратегических исследований Республики Башкортостан, Стерлитамакский филиал, Стерлитамак

\*\*Башкирский госуниверситет, Стерлитамакский филиал, Стерлитамак

Представлен вывод и дана новая интерпретация коэффициента, характеризующего упругие фильтрационные свойства жидкой фазы в пористой среде, где снимается требование совпадения этого коэффициента со сжимаемостью скелета при малой пористости.

Любое уравнение состояния может быть представлено в виде ряда Тейлора в окрестности давления  $P_l$ . Для малых перепадов давления  $P - P_l$  достаточно сохранить два первых члена разложения плотности фильтрующейся жидкости  $\rho = \rho_0(1 + \alpha(P - P_l))$ . Для материала скелета оно представляется как  $\rho_s = \rho_{s0}(1 + \beta_s(P - P_l))$ , где  $\alpha = \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_{P=P_l}$ ,  $\beta_s = \frac{1}{\rho_{s0}} \left( \frac{\partial \rho_{s0}}{\partial P} \right)_{P=P_l}$  – коэффициенты сжимаемости.

Вычисление коэффициента сжимаемости жидкой фазы в составе пористой среды основано на преобразовании первого слагаемого уравнения (для простоты одномерного) неразрывности  $\frac{\partial(\rho m)}{\partial t} + \frac{\partial j_x}{\partial x} = 0$  в баротропном приближении как  $\frac{\partial \rho m}{\partial t} = \frac{d\rho m}{dP} \frac{\partial P}{\partial t}$ . Выражение для этого коэффициента сжимаемости имеет вид  $\beta = \frac{1}{\rho m} \frac{d\rho m}{dP}$ .

Для производной от произведения плотности  $\rho$  и пористости  $m$  по давлению  $P$  получим  $\frac{d\rho m}{dP} = \rho \frac{dm}{dP} + m \frac{d\rho}{dP}$ . Производная от плотности фильтрующейся среды по давлению с помощью линеаризованного уравнения состояния представляется как  $\frac{d\rho}{dP} = \rho_0 \alpha$ .

Для вычисления  $\frac{dm}{dP}$  уравнение неразрывности для скелета пористой сред представим как  $\frac{\partial(\rho_s(1-m))}{\partial t} = \frac{d(\rho_s(1-m))}{dP} \frac{\partial P}{\partial t} = 0$ , то отсюда с помощью уравнения состояния для материала скелета получим выражение для производной от пористости по давлению в виде  $\frac{dm}{dP} = (1-m) \frac{\rho_{s0}}{\rho_s} \beta_s$ . Выражение для производной от  $\rho m$  по давлению запишем в виде  $\frac{d\rho m}{dP} = \rho_0 m \alpha + \rho(1-m) \frac{\rho_{s0}}{\rho_s} \beta_s$ .

В точке линеаризации  $\rho_s = \rho_{s0}$ ,  $m = m_0$ , поэтому выражение для коэффициента сжимаемости жидкой фазы с учетом влияния скелета  $\beta$  зависит от пористости  $m$  коэффициентов сжи-

маемости жидкости  $\alpha$  и материала скелета  $\beta_s$  следующим образом (индекс нуль опущен):

$$\beta = \alpha + \frac{1-m}{m} \beta_s.$$

Это выражение показывает, что при  $m = 1$  сжимаемость жидкой фазы в пористой среде совпадает со сжимаемостью жидкости вне пористой среды  $\beta = \alpha$ , что очень физично и закономерно. Второй же предел при  $m \rightarrow 0$  вызывает недоумение, поскольку  $\beta \rightarrow \infty$  и не совпадает со сжимаемостью скелета  $\beta_s$ .

Трудно сомневаться в справедливости полученного результата, поскольку он получен на основе закона сохранения массы с использованием представления уравнения состояния в виде ряда Тейлора, не подлежащих сомнению.

Физическая интерпретация полученного результата заключается в следующем. При высоких значениях пористости, действительно, процесс фильтрации определяется преимущественно сжимаемостью жидкости. При уменьшении пористости вклад сжимаемости скелета возрастает до значений, превышающих сжимаемость жидкости, и становится преобладающим.

Эффект заключается в том, что при малой пористости вытеснение жидкости из пористой среды происходит за счет расширения скелета и уменьшения пористости.

Что касается требования совпадения сжимаемости  $\beta$  со сжимаемостью скелета  $\beta_s$  при нулевой пористости, которое использовано в классических работах [1 – 3], то оно не имеет физического смысла, поскольку в этом случае жидкая фаза отсутствует, а процесс фильтрации не реализуется.

## Список литературы:

- [1] Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. Москва; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2004, 628 с.
- [2] Бузинов С. Н. Исследование пластов и скважин при упругом режиме фильтрации. М: Недра, 1964. 272 с
- [3] Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.

<sup>1</sup> Проект № 16-08-00728 А РФФИ