

ГИДРАВЛИКА

Б. Б. ЛАПУК и В. А. ЕВДОКИМОВА

**ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ  
В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ  
РЕЖИМОВ ФИЛЬТРАЦИИ**

(Представлено академиком Л. С. Лейбензоном 8 XII 1950)

На основании принципа однородности размерностей скорость фильтрации  $v$  жидкостей и газов может быть представлена в следующем виде (<sup>1, 2</sup>):

$$|v| = C k^{\frac{3n-1}{2}} \mu^{1-2n} \rho^{n-1} \left| \frac{dp}{dr} \right|^n, \quad (1)$$

где  $k$  — проницаемость пласта;  $\mu$  — абсолютная вязкость жидкости или газа;  $\rho$  — плотность их;  $p$  — давление в точке, удаленной на расстояние  $r$  от скважины (рассматриваем случай плоского радиального движения);  $n$  — показатель режима фильтрации, являющийся, как было показано нами (<sup>3</sup>), функцией числа Рейнольдса  $Re$ , а  $C$  — безразмерный коэффициент, связанный с числом Слихтера  $Sl$  зависимостью (<sup>1, 2</sup>)

$$C = (Sl Re_{кр}^2)^{\frac{1-n}{2}}; \quad (2)$$

здесь  $Re_{кр}$  — критическое значение числа Рейнольдса.

Так как  $n$  есть функция  $Re$ , то, согласно формуле (2), коэффициент  $C$  при нарушении линейного закона фильтрации не является постоянной величиной, а также зависит от числа Рейнольдса.

На рис. 1 приведены кривые  $C = C(Re)$ , построенные нами по формуле (2) для несцементированных песков и образца песчаника на основании зависимости  $n = n(Re)$ , найденной по экспериментальным данным (<sup>3</sup>).

Весовой расход несжимаемой жидкости  $G_{жс}$  и газа  $G_2$  при радиальной фильтрации на основании формулы (1) равен

$$G_{жс} = 2\pi r b |v| \gamma = 2\pi r b C(n) k^{\frac{3n-1}{2}} \mu^{1-2n} \left| \frac{dp}{dr} \right|^n \gamma, \quad (3)$$

$$G_2 = 2\pi r b |v| \gamma = 2\pi r b C(n) k^{\frac{3n-1}{2}} \mu^{1-2n} g \left( \frac{\rho_{ам}}{p_{ам}} \right)^n \left| p \frac{dp}{dr} \right|^n, \quad (3')$$

где  $b$  — мощность пласта,  $\gamma$  — удельный вес жидкости или газа;  $\rho_{ам}$  — плотность жидкости или газа при атмосферном давлении  $p_{ам}$  и пластовой температуре. Фильтрация жидкостей или газов, согласно (<sup>1, 2</sup>), принимается изотермической.

Разделив в уравнении (3) переменные  $p$  и  $r$  и произведя интегрирование по  $p$  в пределах  $p_c$  (давление на забое скважины) до  $p$  и по  $r$  от  $R_c$  (радиус скважины) до  $r$ , получим

$$p = p_c + \int_{R_c}^r \psi_{ж}(r) dr, \quad (4)$$

где

$$\psi_{ж}(r) = \left[ \frac{G_{ж}}{2\pi b \gamma} \frac{1}{rC(n)} \right]^{1/n} k^{\frac{1-3n}{2n}} \mu^{2-\frac{1}{n}}. \quad (5)$$

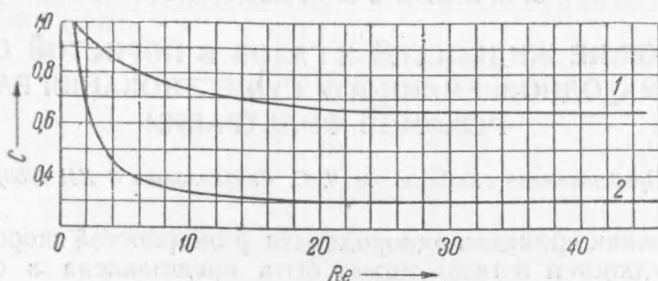


Рис. 1. 1 — несцементированные пески, 2 — сцементированные пески (образец песчаника)

Вводя в уравнение (3') переменную  $P = p^2$  и интегрируя по  $P$  в пределах от  $P_c$  до  $P$  и по  $r$  от  $R_c$  до  $r$ , найдем

$$P = P_c + A \int_{R_c}^r \psi_2(r) dr, \quad (6)$$

где

$$\psi_2(r) = \left[ \frac{G_2}{2\pi b g} \frac{1}{rC(n)} \right]^{1/n} k^{\frac{1-3n}{2n}} \mu^{2-\frac{1}{n}}, \quad A = \frac{2p_{ат}}{\rho_{ат}}. \quad (7)$$

Формулы (4) и (6) позволяют найти распределение давления в пласте, соответственно, при движении несжимаемой жидкости и газа в условиях одновременного существования различных законов фильтрации. Рассмотрим пример.

**Пример.** Определить распределение давления в пласте при радиальном движении газа в условиях одновременного существования различных законов фильтрации и сопоставить полученные результаты с данными о распределении давления при фильтрации по закону Дарси и при двухрежимной фильтрации со скачкообразным изменением показателя режима фильтрации от 1 до 0,5 (как это принималось В. Н. Щелкачевым (4) и Б. Б. Лапуком (2)).

**Исходные данные.** а) Несцементированные пески: дебит скважины  $Q = 3,23 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сутки, радиус скважины  $R_c = 0,1$  м, радиус контура питания  $R_k = 750$  м, мощность пласта  $b = 10$  м, пористость пласта  $m = 20\%$ , абсолютная вязкость газа  $\mu = 0,012$  сантипуаза, проницаемость пласта  $k = 4$  дарси, плотность газа  $\rho = 0,0682$  кг·м<sup>-4</sup>·сек<sup>2</sup>. Эффективный диаметр зерен песка  $d_s = 0,117$  мм, критическое значение числа Рейнольдса  $Re_{кр} = 1$ . За атмосферное давление принимается  $p_{ат} = 10^4$  кг/м<sup>2</sup>. Давление на забое скважины  $p_c = 1$  ата. Следовательно, дебит скважины  $Q = 3,23 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сутки представляет „абсолютный свободный дебит“.

б) Песчаник (образец № 22 <sup>(5,6)</sup>):  $m = 22,1\%$ ,  $k = 3,39$  дарси,  $d_s = 0,162$  мм. Остальные условия те же, что и для несцементированных песков\*.

Исходя из графиков зависимости  $n = n(Re)$  <sup>(3)</sup>, по формулам (4) и (6) графическим интегрированием находим  $p = p(r)$ , причем при  $r = R_k$   $p = p_k$  — давление на „контуре питания“.

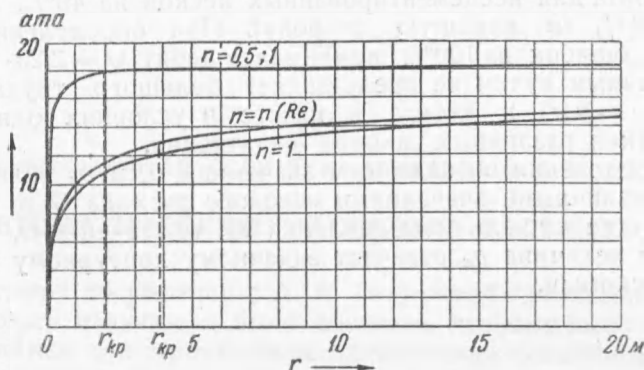


Рис. 2. Несцементированные пески

Результаты соответствующих вычислений приведены на рис. 2 и 3. Из рассмотрения рис. 2 и 3 видно, что кривая распределения давления для несцементированных песков при одновременном существовании различных законов фильтрации газа в пласте проходит зна-

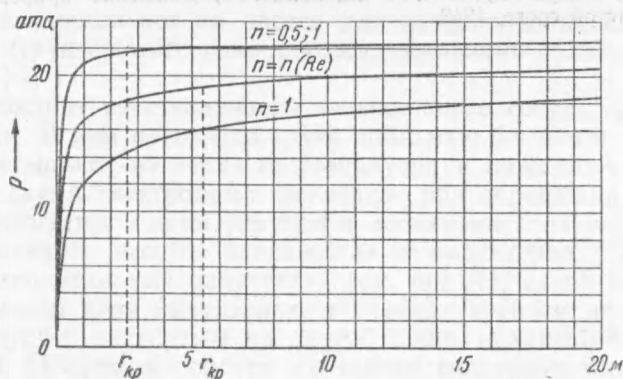


Рис. 3. Сцементированные пески (образец песчаника)

чительно ниже кривой распределения давления при скачкообразном изменении показателя режима фильтрации и намного выше кривой распределения давления при линейном законе фильтрации.

Для песчаника (сцементированный песок) кривая распределения давлений при одновременном существовании различных законов фильтрации проходит приблизительно посередине между кривой распределения давления при скачкообразном изменении показателя режима фильтрации и кривой распределения давления при линейном законе фильтрации.

Если во всем пласте фильтрация происходит по линейному закону, то при тех же забойном ( $p_c$ ) и контурном ( $p_k$ ) давлениях расходы газа составят: для песка  $Q = 3,59 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сутки, для песчаника

\* Эффективный диаметр зерен песка и песчаника определялся по способу веса средней частицы <sup>(3)</sup>.

$Q = 5,18 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сутки. Таким образом, при игнорировании нарушения в призабойной зоне пласта линейного закона фильтрации ошибка в определении величины дебита газа составит для несцементированных песков 11,1%, а для песчаника 53%.

Отметим, что расчет дебита, основанный на допущении скачкообразного изменения величины  $n$  от 1 до 0,5, приводит к ошибке в величине дебита для несцементированных песков на 49%, а для песчаника на 51% (в меньшую сторону). При определении величины указанных ошибок за 100% принимался дебит  $Q = 3,23 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/сутки.

Аналогичным путем не представляет большого труда вычислить значения  $p = p(r)$  и дебита в пласте в условиях одновременного существования различных законов фильтрации.

Для определения по заданным значениям  $p_c$  и  $p_k$  величины дебита задаемся различными значениями весового расхода  $G$  и находим соответствующие им величины давлений  $p_k$ ; то значение  $G$ , при котором полученная величина  $p_k$  отвечает заданному контурному давлению, и является искомым.

Поступило  
2 X 1950

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. Н. Щелкачев и Б. Б. Лапук, Подземная гидравлика, М.—Л., 1949.  
<sup>2</sup> Б. Б. Лапук, Теоретические основы разработки месторождений природных газов, М.—Л., 1948. <sup>3</sup> Б. Б. Лапук и В. А. Евдокимова, ДАН, **73**, № 4 (1950).  
<sup>4</sup> В. Н. Щелкачев, Основы подземной нефтяной гидравлики, 1944. <sup>5</sup> Д. Фенчер, Д. Льюис и К. Бернс, Физические испытания пород нефтяных и газовых пластов и их свойства, Баку—М., 1934. <sup>6</sup> М. Маскет, Движение природных жидкостей и газов в пористой среде, 1949.