

ГИДРОМЕХАНИКА

Б. Б. ЛАПУК

**ДВИЖЕНИЕ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ**

(Представлено академиком Л. С. Лейбензоном 5 IV 1947)

Особенностью реальных углеводородных газов по сравнению с идеальным газом являются их отклонения от уравнения Клапейрона. Следует указать также на значительные изменения вязкости природных газов при падении давления в пласте.

В существующих аналитических решениях задач о фильтрации газов<sup>(1-4)</sup> вязкость газов принималась постоянной, а газ — совершенным. Настоящая статья представляет попытку дать приближенное решение задачи об установившемся и не установившемся движениях газов в пористой среде с учетом изменений их свойств в пластовых условиях.

I. Установившаяся фильтрация реальных газов. Весовая скорость фильтрации газа в направлении  $x$  может быть представлена в следующем виде:

$$\gamma v = -k(x) \varphi(p) \frac{dp}{dx}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — удельный вес газа;  $v$  — скорость фильтрации;  $k(x)$  — проницаемость пласта, которую в ряде случаев можно рассматривать как функцию  $x$ , в однородных по проницаемости пластах  $k = \text{const}$ ;  $p$  — давление;  $\varphi(p) = \gamma/\mu$ ,  $\mu$  — абсолютная вязкость газа.

Удельный вес газов  $\gamma = p/zRT$ , где  $z$  — коэффициент сжимаемости газа,  $R$  — газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура.

Рассматривая фильтрацию газа как изотермический процесс (см. (4)), можно принять, что  $z = z(p)$  и  $\mu = \mu(p)$ . Значения коэффициентов сжимаемости легко определить по данным о псевдокритических давлениях и температурах углеводородных газов (см. (5-7)). Зависимость абсолютной вязкости углеводородных газов от давления можно найти в (8, 9) и др.

Зная скорость фильтрации газа, легко найти его весовой расход  $G$ :

$$G = |\gamma v| F(x), \quad (2)$$

где  $F(x)$  — площадь сечения пласта, которая должна быть задана как функция координаты  $x$ .

В случае линейного движения  $F(x) = \text{const}$ . При радиальной фильтрации  $F(x) = 2\pi hx$ , где  $h$  — мощность пласта, а  $x$  — расстояние от скважины до точки пласта, в которой давление равно  $p$  и скорость фильтрации равна  $v$ .

Подставляя в (2) значение весовой скорости фильтрации из формулы (1), получим

$$G = k(x) F(x) \varphi(p) \frac{dp}{dx}.$$

Разделяя переменные и обозначая  $f(x) = \frac{1}{k(x)F(x)}$ , имеем

$$Gf(x) dx = \varphi(p) dp. \quad (3)$$

Величина  $x$  изменяется в пределах от  $x_c$  (радиус скважины) до  $x_k$  (расстояние до контура питания) в условиях радиального движения и от 0 до  $L_k$  при линейном движении, если начало координат взято у стока газа (галерея). Величина  $p$  изменяется от  $p_c$  (значение давления на забое скважины или галереи) до  $p_k$  (значение на контуре питания).

Интегрируя (3) в указанных пределах, получим

$$G = \frac{\int_{p_c}^{p_k} \varphi(p) dp}{\int_{x_c}^{x_k} f(x) dx}.$$

Обозначим постоянную

$$A = \int_{x_c}^{x_k} f(x) dx. \quad (4)$$

В случае линейного движения в однородном пласте

$$A = \frac{L_k}{kF}. \quad (4a)$$

При радиальной фильтрации в однородном пласте

$$A = \frac{\ln \frac{x_c}{x_k}}{2\pi kh}. \quad (4b)$$

Введем приведенный дебит  $G^* = AG$ . Тогда

$$G^* = \int_{p_c}^{p_k} \varphi(p) dp. \quad (5)$$

Весовой расход газа

$$G = \frac{1}{A} G^*. \quad (6)$$

Величину  $G^*$  нетрудно определить путем графического интегрирования функции  $\varphi(p)$ , значения которой определяются по указанным выше экспериментальным данным.

Найдем распределение давления в пласте. Для этого проинтегрируем уравнение (3) в других пределах:

$$G \int_{x_c}^x f(x) dx = \int_{p_c}^p \varphi(p) dp. \quad (7)$$

Обозначим

$$\psi(p) = \int_{p_c}^p \varphi(p) dp. \quad (8)$$

Тогда в случае радиального движения в однородном пласте

$$\psi(p) = \frac{G}{2\pi kh} \ln \frac{x}{x_c}. \quad (9)$$

При линейном движении в однородном пласте

$$\psi(p) = \frac{G}{kF} x. \quad (10)$$

Задаваясь различными значениями давления  $p$ , заключенными в пределах между значениями давления  $p_c$  (на скважине или в галлее) и  $p_k$  (на контуре питания), находим по экспериментальным данным значения  $\varphi(p)$  и по формуле (8) отвечающие им значения  $\psi = \psi(p)$  и из формул (9) или (10) определяем соответствующие значения  $x$ . В общем случае для каждого значения  $\psi$  значение  $x$  определяется подбором так, чтобы выдерживалось равенство (7).

Следует иметь в виду, что формула (2) является точной лишь в тех случаях, когда скорости фильтрации одинаковы во всех точках площади сечения пласта  $F(x)$ , как это имеет место в условиях линейной и радиальной фильтрации газов. При неравномерном распределении скоростей фильтрации по площади  $F(x)$  в качестве приближения расчет можно вести по среднему по площади  $F(x)$  значению скорости фильтрации  $v$ .

II. Не установившаяся радиальная фильтрация реальных газов в пористой среде. В условиях газового режима, при котором запас энергии в пласте не пополняется извне, уравнение истощения залежи может быть написано в следующем виде:

$$Gdt = -\Omega d\tilde{\gamma}, \quad (11)$$

где  $G$  — весовой расход газа,  $t$  — время,  $\Omega$  — объем порового пространства газовой залежи,  $\tilde{\gamma}$  — средневзвешенное по объему значение удельного веса газа:

$$\tilde{\gamma} = \frac{1}{\Omega} \int \gamma d\Omega. \quad (12)$$

Как было показано нами (3, 10), в условиях радиальной фильтрации флюидов средневзвешенное по объему пласта давление  $\tilde{p}$  в практических расчетах может быть принято равным контурному давлению  $p_k$ , а следовательно, можно также принять, что

$$\tilde{\gamma} \cong \gamma_k. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (11), получим уравнение истощения залежи в виде

$$Gdt = -\Omega d\gamma_k. \quad (14)$$

Отсюда

$$t = \Omega \int_{\gamma_k}^{\gamma_n} \frac{d\gamma_k}{G}, \quad (15)$$

где  $\gamma_n$  и  $\gamma_k$ , соответственно, значения  $\gamma_k$  при  $t=0$  (начальный момент разработки пласта, когда пластовое давление  $p_k$  равно начальному давлению  $p_n$ ) и в некоторый момент времени  $t$ , когда контурное давление равно  $p_k$ .

Рассматривая неустановившуюся радиальную фильтрацию флюидов как непрерывную последовательность стационарных состояний, можно в формулу (15) подставить вместо весового расхода  $G$  его значение из формулы (6), причем величина  $A$  дается формулой (46). Тогда

$$t = A\Omega \int_{\gamma_k}^{\gamma_H} \frac{d\gamma_k}{G^*}.$$

Вводя приведенное время

$$\tau = \frac{1}{A\Omega} t, \quad (16)$$

имеем

$$\tau = \int_{\gamma_k}^{\gamma_H} \frac{d\gamma_k}{G^*}. \quad (17)$$

Для нахождения величины  $\tau$  должно быть известно условие отбора флюида на скважинах. Такими условиями могут быть следующие: 1)  $G = \text{const}$ , что дает также  $G^* = \text{const}$ ; 2)  $p_c = \text{const}$  — поддержание постоянного давления на скважинах; 3) поддержание постоянной скорости фильтрации газа в призабойной зоне пласта.

При условии отбора  $G = \text{const}$  из формулы (17) имеем

$$\tau = \frac{\gamma_H - \gamma_k}{G^*}. \quad (18)$$

При эксплуатации скважин в условиях поддержания постоянного давления на скважинах порядок вычислений следующий. Задаемся различными значениями контурного давления  $p_k$ , по формуле (5) определяем значения  $G^*$ ; далее по графику  $\tau = \tau(\gamma_k)$ , построенному по формуле (17), находим соответствующие значения  $\tau$  и из формулы (16) вычисляем отвечающие им значения времени  $t$ .

При эксплуатации скважин в условиях поддержания постоянной скорости фильтрации в призабойной зоне скважин порядок вычисления следующий. Задаемся значением контурного давления  $p_k$  и по формуле (5) подбираем значение давления в скважине  $p_c$  таким образом, чтобы скорость фильтрации газа в призабойной зоне была постоянна и равна величине, установленной исходя из геолого-технических соображений. При этом значении  $p_c$  находим величину  $G^*$ . Затем задаемся новым значением  $p_k$  и т. д. Построив график зависимости величины  $1/G^*$  от  $\gamma_k$ , находим по формуле (17) значения  $\tau$ , отвечающие соответствующим величинам  $p_k$ , и из формулы (16) определяем значение  $t$ .

Поступило  
5 IV 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Л. С. Лейбензон, Нефтепромысловая механика, II, 1934. <sup>2</sup> M. Muskat, The Flow of Homogeneous Fluids through Porous Media, N. Y.—London, 1937.  
<sup>3</sup> Б. Б. Лапук, Газодинамические основы разработки месторождений природных газов, Докторская диссертация, Московск. нефт. ин-т им. И. М. Губкина, 1946.  
<sup>4</sup> Б. Б. Лапук, Нефтяное хозяйство, № 3 (1940). <sup>5</sup> И. Н. Стрижов и И. Е. Ходанович, Добыча газа, М.—Л., 1946. <sup>6</sup> А. С. Смирнов, Технология углеводородных газов, М.—Л., 1946. <sup>7</sup> M. B. Standing and D. L. Katz, Trans. AIME, 146, 140 (1942). <sup>8</sup> B. H. Sage and W. N. Lacey, Trans. AIME, 127, 118 (1938).  
<sup>9</sup> L. B. Richer and D. L. Katz, Trans. AIME, 155, 246 (1944); Petr. Eng., 15, No. 10 (1944). <sup>10</sup> Б. Б. Лапук, Нефтяное хозяйство, № 4 (1947).