

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СКВАЖИНЫ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ В НАПОРНОМ ПЛАСТЕ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Г. А. Разумов (Москва)

Приближенные гидромеханические решения задачи методом суперпозиции линейных источников-стоков и методом отображений дано в работе Д. Кокки [1] для условий напорного пласта с круговым контуром питания и в работах П. Я. Полубариновой-Кочиной [2,3] — для условий расположения скважин под горизонтальной плоскостью равного потенциала, а также напорного потока при неограниченной мощности водоносного пласта.

Ниже приводится исследование горизонтальных скважин конечной длины и их радиальных систем в условиях водоносного напорного пласта ограниченной мощности с прямолинейным контуром питания.

При выводе приближенных расчетных формул производится замена теоретического линейного стока с постоянной по длине интенсивностью q фильтром, имеющим форму ближайшей к скважине эквипотенциали в виде эллипсоида вращения. Такой способ для горизонтальных скважин применяет П. Я. Полубаринова-Кочина, а до нее Н. К. Гирицкий — для вертикальных скважин. Переход от воображаемого фильтра-эквипотенциали к реальной трубчатой скважине с радиусом r_c можно выполнить, например, приравниванием площади водоприемной поверхности эллипсоида с малой полуосью b и цилиндра равной длины: $b = 1.415 r_c$.

Величину b можно определять также и из условия равенства не площадей поверхности, а объемов воображаемого и реального фильтров: $b = 1.225 r_c$.

Более точным способом исключения теоретического линейного стока с постоянной по длине удельной интенсивностью является способ осреднения потенциалов, применяемый Н. Н. Веригиным.

Например, для скважины в безграничном пространстве осредненный по ее длине потенциал скорости фильтрации равен:

$$\Phi_0 = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} \Phi(x, r_c) dx = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{l}{1.356 r_c}$$

Таким образом, последний способ дает почти среднее значение величины b по сравнению с результатами двух приведенных выше приемов введения в рассмотрение эллипсоидальной фильтра-эквипотенциали: $b = 1.356 r_c$.

§ 1. Приток к одиночной горизонтальной скважине. 1. Скважина, параллельная контуру питания (фиг. 1, а). Рассматривается линейный сток, расположенный в середине мощности напорного пласта на глубине $l/2$ м. Для удовлетворения граничного условия на контуре питания при $x = 0$ вправо от оси y расположим симметричный источник, для удовлетворения граничного условия на водонепроницаемых кровле и подошве пласта на расстояниях mn — бесконечные ряды отображенных стоков и источников равной интенсивности. Тогда потенциал скорости можно записать в следующем виде:

$$\Phi(x, y, z) = \frac{q}{4\pi} \int_{-l/2}^{l/2} \left[\frac{d\eta}{R_+(z, 0)} - \frac{d\eta}{R_-(z, 0)} \right] + \quad (1.1)$$

$$+ \frac{q}{4\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \int_{-l/2}^{l/2} \left[\frac{d\eta}{R_+(z, n)} - \frac{d\eta}{R_-(z, n)} \right] - kh_1$$

$$R_{\pm}(z, n) = \sqrt{(x \pm x_0)^2 + (y - \eta)^2 + (z - mn)^2} \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Здесь k — коэффициент фильтрации, h_1 — напор на контуре питания.

Определим понижение на поверхности скважины в точке $(-x_0, 0, b)$.

После интегрирования (1.1) и некоторых упрощений получим (здесь, как и всюду ниже величина b считается пренебрежимо малой по сравнению с другими линейными размерами):

$$h_1 - h_c = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{4lx_0}{b\Lambda_0(l, x_0, 0)} + \frac{q}{\pi k} \sum_{n=1}^{\infty} \ln \frac{\Lambda_0(l, 0, n) \Lambda_0(0, x_0, n)}{2mn \Lambda_0(l, x_0, n)} \quad (1.2)$$

Здесь

$$\Lambda_0(l, x_0, n) = l + \sqrt{l^2 + 16x_0^2 + 4(mn)^2}, \quad h_c = -\frac{\Phi(-x_0, 0, b)}{k}$$

(h_c — напор на скважине). Рассмотрим отдельно сумму ряда, входящую в (1.2):

$$\sum_1^{\infty} \ln V_n + \sum_1^{\infty} U_n \quad (1.3)$$

Здесь

$$V_n = \frac{\Lambda_0(l, 0, n)}{\Lambda_0(l, x_0, n)}, \quad U_n = \frac{\Lambda_0(0, x_0, n)}{2mn} \quad (1.4)$$

Можно показать, что второй ряд выражения (1.3) сходится

$$\sum_1^{\infty} \ln U_n = \ln \prod_1^{\infty} U_n = \frac{1}{2} \ln \prod_1^{\infty} \left[1 + \frac{4x_0^2}{(mn)^2} \right] = \frac{1}{2} \ln \left[\operatorname{sh} \frac{2\pi x_0}{m} / \frac{2\pi x_0}{m} \right] \quad (1.5)$$

Теперь исследуем сходимость первого ряда в выражении (1.3). Для этого составим мажоранту для ряда с членами $\ln W_n = -\ln V_n$.

Пусть $W_n = 1 + v_n$. Тогда можно получить

$$v_n = \frac{\Lambda_0(l, x_0, n)}{\Lambda_0(l, 0, n)} - 1 < \left[\frac{1}{8} \left(\frac{l}{x_0} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{m}{x_0} \right)^2 n^2 \right]^{-1} \quad (1.6)$$

При достаточно большом n величина v_n мала, и приближенно можно считать, $\ln W_n = \ln(1 + v_n) \approx v_n$.

Ряд с членами, равными правой части (1.6), будет мажорантой для ряда с членами v_n , а следовательно, и для ряда с членами $\ln W_n$. Так как он сходится, то и исходный ряд с членами $\ln V_n$ также сходится.

Ряд с членами $\ln V_n$ медленно сходящийся, его сходимость существенно ухудшается с ростом величины x_0/m . При отсутствии границы с постоянным потенциалом, т. е. при $x_0 \rightarrow \infty$, исследуемые ряды расходятся.

Так как найти суммы ряда с членами $\ln V_n$ не представляется возможным, то для практического пользования формулой (1.2) можно ограничиться суммированием некоторого числа j первых членов с достаточной малой погрешностью (например, меньшей 10%). Воспользуемся следующим приемом. Введем монотонно убывающую функцию $v(\chi)$, которая в целочисленных точках оси χ : $1, 2, \dots, j, \dots, n$ принимает значения $v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_n$. Тогда относительно суммы S рассматриваемого ряда можно записать неравенство

$$S < \int_{\chi=0}^{\infty} v(\chi) d\chi \quad (1.7)$$

Функцию $v(\chi)$ задаем при помощи правой части неравенства (1.6) и получаем

$$\int_0^{\infty} v(\chi) d\chi = 8 \left(\frac{x_0}{l} \right)^2 \int_0^{\infty} \left[1 + 4 \left(\frac{m}{l} \right)^2 \chi^2 \right]^{-1} d\chi = 4 \frac{x_0^2}{mi} \frac{\pi}{2} \quad (1.8)$$

Суммы первых членов ряда $\ln V_1 U_1 + \ln V_2 U_2 + \dots$ были вычислены для различных значений x_0/m и l/m . Суммирование ограничено таким j -м членом, при котором отбрасывание остатка ряда вносит погрешность, равную 10%, по отношению к сумме ряда, определенной с учетом (1.8). Так как функция $v(\chi)$ задана при помощи члена мажорантного ряда, указанная погрешность в действительности должна быть значительно меньше 10%.

Значения j , которым ограничено суммирование, приведены в табл. 1.

Таблица 1

l/m	$x_0/m = 1$	3	5	7	10	15	20	25	50
0.5	8	12	26	30	40	52	70	80	100
1	10	14	30	37	50	60	80	100	130
4	12	16	32	48	60	70	90	115	160
6	16	18	34	55	70	80	100	130	180
10	20	30	40	60	80	100	120	150	220

Если в рядах (1.2) ограничиться только первым членом, то оставшуюся сумму ряда, определенную вышеуказанным способом, можно учитывать коэффициентом

$$\mu = \frac{1}{\ln(V_1 \cdot U_1)} \sum_{n=1}^{n=j} \ln(V_n \cdot U_n)$$

который рекомендуется находить при помощи графиков $\mu = \mu(x_0/m, l/m)$, фиг. 2. Тогда выражение (1.2) примет вид

$$h_1 - h_c = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{4lx_0}{b\Lambda_0(l, x_0, 0)} + \mu \frac{q}{\pi k} \ln \frac{\Lambda_0(l, 0, 1) \Lambda_0(0, x_0, 1)}{2m\Lambda_0(l, x_0, 1)} \quad (1.9)$$

Проведя исследование, аналогичное предыдущему, можно получить формулу для определения величины понижения в случае несимметричного заложения скважины относительно водоупорных границ на глубине z_0 от кровли пласта

$$h_1 - h_c = \frac{q}{2\pi k} \left[\ln \frac{4lx_0}{b\Lambda_0(l, x_0, 0)} + \mu \ln \frac{\Lambda(l, 0, 0, z_0) \Lambda(l, 0, m, z_0) \Lambda(0, x_0, 0, z_0) \Lambda(0, x_0, m, z_0)}{16z_0(m - z_0) \Lambda(l, x_0, 0, z_0) \Lambda(l, x_0, m, z_0)} \right] \quad (1.10)$$

Здесь

$$\Lambda(l, x_0, m, z_0) = l + \sqrt{l^2 + 16x_0^2 + 16(m - z_0)^2}$$

Из выражения (1.10) при $x_0 \rightarrow \infty, (m - z_0) \rightarrow \infty$ и $\mu = 1$ следует формула П. Я. Плубариновой-Кючиной [2, 3] для условий водоносного пласта неограниченной мощности

$$h_1 - h_c = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{l(l + \sqrt{l^2 + 16z_0^2})}{4bz_0} \quad (1.11)$$

Исследование влияния глубины заложения скважины на ее дебит показывает, что максимальный дебит соответствует симметричному расположению скважины относительно водоупорных границ. Табл. 2 иллюстрирует уменьшение дебита скважины при перемещении ее по высоте пласта (коэффициент $\alpha = q_{z_0} / q_{\max}$).

Из приведенного выше решения нетрудно также получить известную формулу бесконечно длинной дрены [например, [4]]. Действительно, первая часть выражения (1.2) при $l \rightarrow \infty$ дает

$$\frac{q}{2\pi k} \ln \frac{4lx_0}{b\Lambda_0(l, x_0, 0)} = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{2x_0}{b} \quad (1.12)$$

Первая сумма в (1.3) при $l \rightarrow \infty$ равна нулю. Выражение (1.5) при $x_0 \geq m$ можно дополнительно упростить, после чего получим

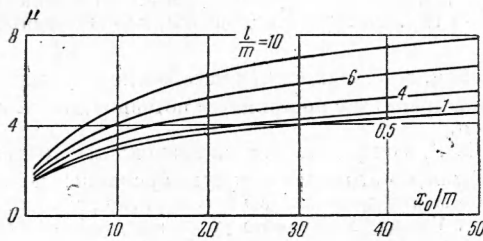
$$h_1 - h_c = \frac{q}{2\pi k} \left(\ln \frac{m}{2\pi b} + \frac{2\pi x_0}{m} \right) \quad (1.13)$$

Оценку эффекта, который дает определение дебита по формуле для скважины конечной длины по сравнению с определением дебита по формуле для бесконечно длинной дрены, можно провести сравнением выражений (1.9) и (1.13).

Приводим отношения $q^\circ = q_{1.9} / q_{1.13}$ дебитов единицы длины горизонтальной скважины, вычисленные соответственно по формулам (1.9) и (1.13) для случаев $x_0/m = 1$ и $b/m = 0.02$

$l/m = 0.5$	1	2	5	10	40	100
$q^\circ = 4.60$	2.22	1.58	1.36	1.22	1.05	1.01

Эти результаты показывают, что концентрация притока на единицу длины относительно коротких скважин значительно выше, чем длинных. Расчет дебита по формуле для скважины конечной длины дает существенное уточнение по сравнению с формулой для бесконечно длинной дрены, что наиболее характерно для относительно корот-



Фиг. 2

Таблица 2

l/m	$z_0/m = 0.00$	0.00	0.10	0.25	0.50
1.0	0.00	0.30	0.70	0.89	1.00
2.5	0.00	0.40	0.75	0.91	1.00
5.0	0.00	0.45	0.80	0.93	1.00
7.5	0.00	0.50	0.825	0.94	1.00
10.0	0.00	0.53	0.85	0.95	1.00

ких скважин. Для относительно длинных скважин результаты расчетов дебита по обеим формулам практически совпадают.

Проведем далее сопоставление удельных дебитов вертикальной совершенной скважины и горизонтальной скважины той же длины и диаметра. Дебит вертикальной скважины, расположенной в том же месте водоносного пласта, что и горизонтальная, как известно, равен

$$Q = \frac{2\pi km (h_1 - h_c)}{\ln(2x_0 / r_c)} \quad [(1.14)]$$

Вычисления, проведенные по формулам (1.14) и (1.9) при $l = m$, для отношения $Q^\circ = Q_0 / Q$, где Q_0 — дебит горизонтальной скважины, ($Q_0 = ql$), дают:

$x_0 / m = 0.5$	2	20	30	40	50	∞
$Q^\circ = 1.124$	1.10	1.05	1.04	1.03	1.02	1.0

Эти результаты согласуются с данными экспериментов на модели ЭГДА, проведенными С. К. Абрамовым и В. Д. Бабушкиным в ВНИИ ВОДГЕО [4].

2. Скважина, произвольно ориентированная относительно контура питания (фиг. 1, б). Составим выражение потенциала скорости для действительной и отображенных скважин, наклонных к прямолинейному контуру питания с учетом радиуса сборной камеры r_0

$$\Phi(x, y, z) = \frac{q}{4\pi} \int_{r_0}^{r_0+l} \left[\frac{d\rho}{R_{\beta+}(z, 0)} - \frac{d\rho}{R_{\beta-}(z, 0)} \right] + \frac{q}{4\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \int_{r_0}^{r_0+l} \left[\frac{d\rho}{R_{\beta+}(z, n)} - \frac{d\rho}{R_{\beta-}(z, n)} \right] - kh_1 \quad (1.15)$$

Здесь

$$R_{\beta\pm}(z, n) = \sqrt{[x \pm (x_0 - \rho \cos \beta)]^2 + (y - \rho \sin \beta)^2 + (z - mn)^2} \\ (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

После интегрирования выражения (1.15) и с учетом ограничения числа членов ряда получим выражение потенциала для скважины, расположенной наклонно к контуру питания под углом $1/2 \pi - \beta$

$$\Phi_\beta(x, y, z) = \frac{q}{4\pi} \ln P_\beta(b, 0) + \mu \frac{q}{2i} \ln P_\beta(0, m) - kh_1 \quad (1.16)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$P_\beta(b, m) = \frac{[A_+(l, x_0) + \sqrt{B_+(l, x_0) + b^2 + m^2}] [A_-(0, x_0) + \sqrt{B_-(0, x_0) + b^2 + m^2}]}{[A_+(0, x_0) + \sqrt{B_+(0, x_0) + b^2 + m^2}] [A_-(l, x_0) + \sqrt{B_-(l, x_0) + b^2 + m^2}]} \quad (1.17)$$

где

$$A_\pm(l, x_0) = r_0 + l - (x \pm x_0) \cos \beta - y \sin \beta \\ B_\pm(l, x_0) = (r_0 + l)^2 - 2(r_0 + l) [(x \pm x_0) \cos \beta \pm y \sin \beta] + (x \pm x_0)^2 + y^2 \quad (1.18)$$

В случае несимметричного расположения скважины относительно водоупоров потенциал скорости может быть записан в виде

$$\Phi_\beta = \frac{q}{4\pi} [\ln P_\beta(b, 0) + \mu \ln P_\beta^\circ(0, z_0) P_\beta^\wedge(m, z_0)] - kh_1 \quad (1.19)$$

Здесь во втором слагаемом

$$P_\beta^\circ(m, z_0) = \frac{[A_+(l, x_0) + \sqrt{B_+(l, x_0) + 4(m - z_0)^2}] [A_-(0, x_0) + \sqrt{B_-(0, x_0) + 4(m - z_0)^2}]}{[A_+(0, x_0) + \sqrt{B_+(0, x_0) + 4(m - z_0)^2}] [A_-(l, x_0) + \sqrt{B_-(l, x_0) + 4(m - z_0)^2}]} \quad (1.20)$$

Найдем, например, величину понижения для скважины с углом $\beta = \frac{\pi}{2}$ в точке $(-x_0, r_0 + l/2, b)$.

Используя общие выражения (1.16)–(1.18), получим

$$\bar{h}_1 - \bar{h}_c = \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{l [\Lambda_1(x_0, 2r_0 - l, l, 0) - l]}{2b\Lambda_1(x_0, 2r_0 - l, 0, 0)} + \mu \frac{q}{2\pi k} \ln \frac{\lambda [\Lambda_1(x_0, 2r_0 - l, l, m) - l]}{\Lambda_1(x_0, 2r_0 - l, 0, m)} \quad (1.21)$$

Здесь

$$\Lambda_1(x_0, 2r_0 - l, l, m) = l + \sqrt{16x_0^2 + (2r_0 - l)^2 - l^2 + 4m^2}, \quad \lambda = \frac{l + \sqrt{l^2 + 4m^2}}{2m}$$

Выражение (1.21) при $r_0 = 0$ обращается в ранее полученное (1.9).

Теперь аналогичным образом рассмотрим скважину, перпендикулярную к контуру питания, при угле $\beta = \pi$. Так же, как и прежде, пользуясь выражениями (1.16)–(1.18), найдем понижение на скважине в точке $[-(x_0 + r_0 + l/2), 0, b]$. При $r_0 = 0$ имеем

$$\bar{h}_1 - \bar{h}_c = \frac{q}{2\pi k} \ln \left[\frac{l}{b} \left(\frac{a_-}{a_+} \right)^{1/2} \right] + \mu \frac{q}{\pi k} \ln \left[\lambda \left(\frac{a_- + \sqrt{a_-^2 + 4m^2}}{a_+ + \sqrt{a_+^2 + 4m^2}} \right)^{1/2} \right] \quad (1.22)$$

где

$$a_{\pm} = 4x_0 + l$$

В случае несимметричного расположения скважины относительно водоупоров согласно (1.19) и (1.20) имеем

$$h_1 - h_c = \frac{q}{2\pi k} \left\{ \ln \left[\frac{l}{b} \left(\frac{a_-}{a_+} \right)^{1/2} \right] + \mu \ln \left[\frac{\Lambda_2(l, 0, 0, z_0) \Lambda_2(l, 0, m, z_0)}{4m(m - z_0)} \sqrt{\frac{\Lambda_2(0, a_-, 0, z_0) \Lambda_2(0, a_-, m, z_0)}{\Lambda_2(0, a_+, 0, z_0) \Lambda_2(0, a_+, m, z_0)}} \right] \right\} \quad (1.23)$$

Здесь

$$\Lambda_2(l, a_{\pm}, m, z_0) = l + a_{\pm} + \sqrt{l^2 + a_{\pm}^2 + 16(m - z_0)^2}$$

Сопоставительные расчеты, проведенные по формулам (1.21) и (1.22), показывают, что величины понижений для скважин, ориентированных параллельно и перпендикулярно к контуру питания, незначительно (в пределах 3–6%) отличаются одна от другой и разница между ними уменьшается с ростом параметров x_0 / m и l / m .

§ 2. Приток к радиальным системам горизонтальных скважин. При работе горизонтальной скважины в системе других лучевых скважин ее дебит уменьшается по сравнению с ее самостоятельной работой за счет взаимодействия с другими скважинами. Применяя принцип суперпозиции, найдем результат влияния $i - 1$ скважин, расположенных равномерно под углами β_i к оси x , например, на скважину с углом $\beta_i = \pi$ (для симметричного расположения скважин относительно водоупорных границ пласта).

Понижение на скважине с углом $\beta_i = \pi$ равно

$$h_1 - h_c = \frac{q}{2\pi k} \ln P_{\pi}(b) + \mu \frac{q}{\pi k} \ln P_{\pi}(m) + \sum_1^{i-1} \frac{q}{2\pi k} \left[\frac{1}{2} \ln P_{\beta_i}(b, 0) + \mu \ln P_{\beta_i}(0, m) \right] \quad (2.1)$$

Здесь величины $P_{\pi}(b)$ и $P_{\pi}(m)$ определяются подлогарифмическими выражениями соответственно первого и второго слагаемого уравнения (1.22).

Значение величины $P_{\beta_i}(b, m)$ можно найти при помощи выражений (1.17) и (1.18), подставляя в них координаты точки на скважине с углом $\beta = \pi$, где определяется понижение $[-(x_0 + r_0 + l/2), 0, b]$.

Для указанного случая имеем

$$P_{\beta_i}(b, m) = \frac{[A(l, l/2, 0) + \sqrt{B(l, l/2, 0) + b^2 + m^2}] [A(0, l/2, x_0) + \sqrt{B(0, l/2, x_0) + b^2 + m^2}]}{[A(0, l/2, 0) + \sqrt{B(0, l/2, 0) + b^2 + m^2}] [A(l, l/2, x_0) + \sqrt{B(l, l/2, x_0) + b^2 + m^2}]} \quad (2.2)$$

Здесь

$$A(l, l/2, x_0) = r_0 + l + (r_0 + l/2 + 2x_0) \cos \beta_i$$

$$B(l, l/2, x_0) = (r_0 + l)^2 + 2(r_0 + l)(r_0 + l/2 + 2x_0) \cos \beta_i + (r_0 + l/2 + 2x_0)^2 \quad (2.3)$$

Дебит радиальной системы горизонтальных скважин можно определить по формуле

$$Q_i = i\alpha \frac{l}{F_i} 2\pi k (h_1 - h_c) \quad (2.4)$$

где коэффициент α следует принимать по табл. 2. Рассмотрим частные случаи трех и четырех скважин, схема которых дана на фиг. 3 (1 — водосборная камера, 2 — контур питания). Величина F_i выражается следующим образом:

а) система трех скважин (фиг. 3, а)

$$F_3 = \ln [P_\pi(b) P_{\pi/3}(b)] + 2\mu \ln [P_\pi(m) P_{\pi/3}(m)] \quad (2.5)$$

Здесь

$$P_{\pi/3}(b) = 20.6c [c + 2l + 2\sqrt{l^2 + cl + c^2}]^{-1} \\ (c = 2x_0 + 0.5l) \\ P_{\pi/3}(m) = \frac{c(2.5l + \sqrt{7l^2 + 4m^2})}{(c + 2l)(0.5l + \sqrt{l^2 + 4m^2})} \quad (2.6)$$

б) система четырех скважин (фиг. 3, б)

$$F_4 = \ln [P_\pi(b) P_{\pi/2}(b)] + 2\mu \ln [P_\pi(m) P_{\pi/2}(m)] + \frac{1}{2} \ln P_0(b) + \mu \ln P_0(m) \quad (2.7)$$

Здесь

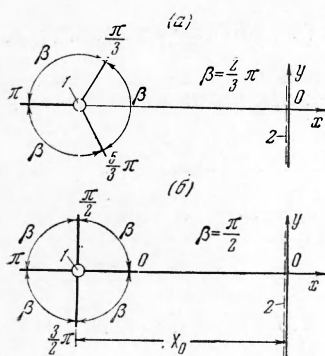
$$P_{\pi/2}(b) = 4.2c (l + \sqrt{l^2 + c^2})^{-1}, \quad P_{\pi/2}(m) = \frac{2c(l + \sqrt{l^2 + m^2})}{(l + \sqrt{l^2 + c^2})\sqrt{l^2 + 4m^2}} \quad (2.8)$$

$$P_0(b) = 3c(c + l)^{-1}, \quad P_0(m) = \frac{c(3l + \sqrt{9l^2 + 4m^2})}{(c + l)(l + \sqrt{l^2 + 4m^2})} \quad (2.9)$$

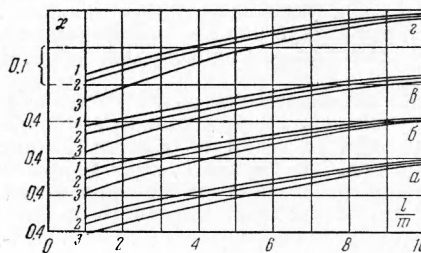
Введем коэффициент интерференции системы горизонтальных скважин

$$\gamma = Q_{(i)}' / Q_0 \quad (2.10)$$

Здесь $Q_{(i)}'$ — дебит каждой скважины радиальной системы, определяется с учетом влияния на нее других скважин по формулам данного параграфа, Q_0 — дебит той же скважины радиальной системы, работающей



Фиг. 3



Фиг. 4

отдельно от других скважин; определяется по формулам предыдущего параграфа.

Проведем исследование взаимодействия скважин, например, для четырехлучевой симметричной системы. Дебит отдельно работающей скважины с углом $\beta_i = \pi$ определяется при помощи формулы (1.22) с учетом $Q_0 = ql$. Дебит той же скважины с учетом влияния на нее остальных трех скважин определяется из выражений (2.4) и (27)

На фиг. 4 приведены графики γ для различных значений: (а) — $x_0/m = 50$, (б) — $x_0/m = 25$, (в) — $x_0/m = 15$, (г) — $x_0/m = 5$, (1) — $b/m = 1/150$, (2) — $b/m = 1/200$, (3) — $b/m = 1/50$.

Из анализа графиков $\gamma = \gamma(x_0/m, l/m, b/m)$ вытекает:

1) степень взаимодействия ниже для относительно длинных скважин. Так при увеличении длины скважин в 10 раз коэффициент интерференции увеличивается от 0.4—0.54 до 0.59—0.7.

2) для относительно коротких скважин степень взаимодействия незначительно снижается при уменьшении диаметра скважин. Так для случая $l/m = 1$ уменьшение диаметра в 10 раз приводит к увеличению коэффициента интерференции от 0.4—0.46 до 0.45—0.51;

3) удаление радиальной системы горизонтальных скважин от области питания приводит к увеличению взаимодействия скважин. Например, при $l/m = 10$, увеличение расстояния от контура питания в 10 раз приводит к уменьшению коэффициента интерференции от 0.67—0.7 до 0.57—0.59.

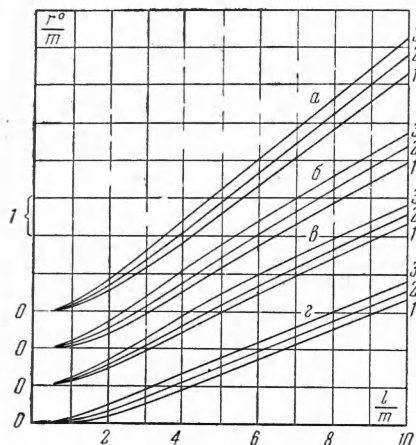
Используя коэффициенты интерференции, дебит радиальной системы горизонтальных скважин можно определять при помощи формулы

$$Q_i = iQ_i' = iQ_0 \gamma \quad (2.11)$$

Например, для четырехлучевой симметричной системы

$$Q_4 = 4\gamma \frac{2\pi k (h_1 - h_c) l}{\ln P_\pi(b) + 2\mu \ln P_\pi(m)} \quad (2.12)$$

где γ можно принимать по графикам фиг. 4.



Фиг. 5. Радиусы эквивалентного вертикального шахтного колодца (цена деления по вертикали 1): а — $x_0/m = 50$, б — $x_0/m = 25$, в — $x_0/m = 15$, г — $x_0/m = 5$; 1 — $b/m = 1/500$, 2 — $b/m = 1/200$, 3 — $b/m = 1/50$

Для оценки эффективности радиальных систем горизонтальных скважин по сравнению с подземными водозаборами вертикального типа выполним приведение четырехлучевой симметричной системы по дебиту и понижению к вертикальному шахтному колодцу. Если ось совершенного вертикального шахтного колодца, работающего стенками, совпадает с вертикальной осью сборной камеры четырехлучевой системы, то получим величину радиуса эквивалентного шахтного колодца в виде

$$r^o = 2x_0 \{P_\pi(b) [P_\pi(m)]^{2\mu}\}^{-\kappa} \quad \left(\kappa = \frac{m}{4\gamma l}\right) \quad (2.13)$$

Из анализа графиков $r^o = r^o(x_0/m, l/m, b/m)$ этой зависимости (фиг. 5) следует:

1) эффективность радиальной системы по сравнению с вертикальным колодцем растет при удлинении горизонтальных лучей. Так при удлинении лучевых скважин в 10 раз радиус эквивалентного шахтного колодца возрастает от $(0.1-0.2)l$ до $(0.34-0.74)l$;

2) эффективность радиальной системы по сравнению с вертикальным колодцем растет при удалении от области питания. Например, для случая $l/m = 10$ при увеличении расстояния от контура питания в 10 раз радиус эквивалентного шахтного колодца увеличивается от $(0.34-0.39)l$ до $(0.67-0.74)l$;

3) увеличение диаметра горизонтальных скважин повышает эффективность радиальной системы в несколько меньшей степени, чем два предыдущих параметра. Так, увеличение диаметра лучевых фильтров в 10 раз приводит к увеличению радиуса эквивалентного шахтного колодца от $(0.1-0.34)l$ до $(0.13-0.39)l$ для случая $x_0/m = 5$ и от $(0.1-0.67)l$ до $(0.16-0.74)l$ для случая $x_0/m = 50$.

Отметим также, что аналогичное предыдущему исследованию можно провести и для горизонтальных скважин в водоносном пласте с круговым контуром питания радиуса R_k , причем для последнего случая могут быть получены выражения, отличающиеся от соответствующих формул § 1 и 2 только тем, что в них $2x_0 = R_k$.

§ 3. Полученные в § 2 формулы согласуются с экспериментами на цилиндрической модели ЭГДА, проведенными Н. А. Чулковым^[5]. При диаметре модели 70 см, масштабе моделирования 1 : 100 ($k = 0.053$ см/сек, $m = 3$ м, $h_1 - h_c = 3$ м) получены следующие величины дебита Q_1 , которые сопоставляются нами с теоретическими Q_2 (л/сек) (табл. 3).

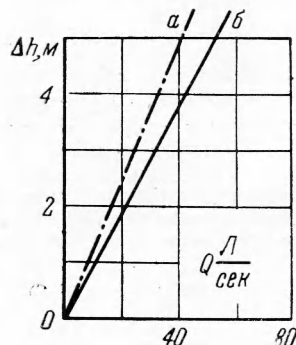
Как видим, отклонение теоретических величин дебита от экспериментальных не превышает 10%.

Таблица 3

Длина скважин в м	Система двух скважин		Система четырех систем	
	Q_1	Q_2	Q_1	Q_2
7.5	13.9	13.28	17.7	17.2
10	16.3	15.87	20.5	19.4
15	21.2	20.42	27.6	25.2

С решениями § 1 корреспондируют данные натуральных исследований, проведенных автором на строящемся лучевом водозаборе в Татарии. На фиг. 6 приведены результаты опытных откачек одиночной горизонтальной скважины длиной 15 м, диаметром 200 мм, заложенной в водоносном пласте мощностью 5.0 м перпендикулярно к контуру питания и результаты вычислений по формуле (1.23) при осредненном коэффициенте фильтрации 63.5 м/сутки.

Фиг. 6. Результаты натуральных исследований, проведенных на строящемся в Татарии Куктякинском опытно-эксплуатационном лучевом водозаборе (а — по данным опытных откачек, б — по формуле (1.23))



В заключение автор благодарит Н. Н. Веригина, под руководством которого проведены изложенные в статье исследования.

Поступила 2 I 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосси G. Sul calcolo di pozzi a raggiera. L'Energia Elettrica. Milano, 1953, t. XXX, N 7.
2. Полубаринова - Кочина П. Я. Задача о системе горизонтальных скважин. Archiwum mechaniki stosowanej, Warszawa, 1955, t. VII, zeszyt 3.
3. Полубаринова - Кочина П. Я. О наклонных и горизонтальных скважинах конечной длины. ПММ, 1956, т. XX, вып. 6.
4. Абрамов С. К., Бабушкин В. Д. Методы расчета притока воды к буровым скважинам. М., Госстройиздат, 1955.
5. Чулков Н. А. Взаимодействие лучевых горизонтальных фильтров в шахтном колодце. Ж. Водоснаб. и санитарн. техн. М., Госстройиздат, 1960, № 6.

К МЕХАНИЗМУ ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ВОДОЙ В ДВУХСЛОЙНЫХ ПЛАСТАХ

И. А. Сафаров

(Москва)

Формирование устойчивого водонефтяного контакта в пористых средах описано в работах [1,2,3].

В предлагаемой работе исследовано влияние высоты слоев и скорости вытеснения на процесс формирования устойчивого водонефтяного контакта в пористых средах. Экспериментально установлено, что устойчивое перемещение водонефтяного контакта в слоистых пористых системах не нарушается при изменении скорости в некотором диапазоне значения скоростей вытеснения, который изменяется с изменением соотношения мощностей.

Обнаруживается, что полнота вымывания нефти из слоистого пласта при устойчивом продвижении водонефтяного контакта зависит от скорости вытеснения.

Эксперименты проводились на двух прозрачных моделях двухслойной пористой среды, изготовленных из гидрофильного кварцевого песка различного фракционного состава для каждого слоя. Отношение высот слоев в моделях равнялось $h_1 / h_2 = 1$ и $h_1 / h_2 = 1/2$, где h_1 и h_2 — соответственно высоты более и менее проницаемых слоев. Отношение проницаемостей k_1 и k_2 соответствующих слоев было равно: $k_1 / k_2 = 7.3$ ($k_1 = 5.83$ дарси, $k_2 = 0.8$ дарси). Моделью нефти служил неполярный керосин вязкостью 1.3—1.4 сантипуаз и плотностью $\rho = 0.78 \text{ г/см}^3$. Связанная вода не моделировалась. Эффект гравитации в проведенных опытах был оценен и оказался пренебрежимо малым.

Визуальные наблюдения процесса вытеснения модели нефти водой показали, что равномерное перемещение поверхности водонефтяного контакта не нарушается, если скорость вытеснения не превосходит определенного предела. На моделях с $h_1 / h_2 = 1$ и $h_1 / h_2 = 1/2$ устойчивое перемещение фронта не нарушалось при изменении скорости