

Глава 3

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ПРИТОКЕ ЖИДКОСТИ К ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА КОНЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Исследуется плоское стационарное течение однородной несжимаемой жидкости в пласте, содержащем вертикальную трещину гидроразрыва эллиптической формы. Фильтрация в пласте и в трещине подчиняется закону Дарси. Получено точное решение задачи о притоке к трещине конечной проводимости при наличии в окрестности трещины области, отличающейся по проницаемости от остального пласта [43, 167]. На основе полученного решения оценивается влияние параметров загрязненной зоны на производительность скважины, пересеченной трещиной гидроразрыва конечной проводимости.

3.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается плоская стационарная фильтрация однородной жидкости, обусловленная точечным источником (стоком) интенсивности Q , расположенным в центре конфокальных эллипсов с полуосями l , w и a , b соответственно и фокусным расстоянием f : $a^2 - b^2 = l^2 - w^2 = f^2$. Эллипсы ограничивают включения, отличающиеся от основного пласта по проницаемости (рис. 3.1). Предполагается, что пласт имеет постоянную толщину h и проницаемость k_1 . Включение, моделирующее трещину гидроразрыва, характеризуется проницаемостью k_2 и полуосями l и w , соответствующими полудлине и полуширине трещины. Область, заключенная между

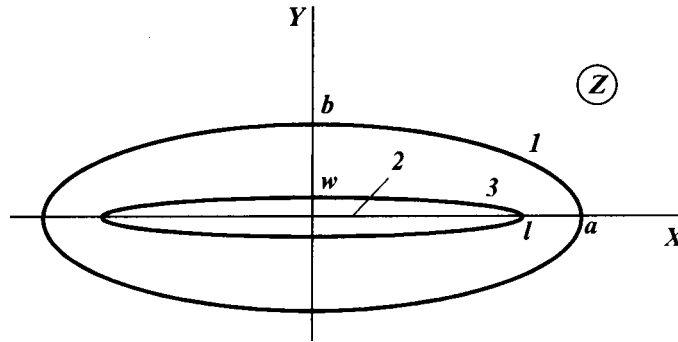


Рис. 3.1. Три области фильтрации:
1 – пласт, 2 – трещина, 3 – загрязненная зона

эллипсами, имеет проницаемость k_3 . При $k_3 < k_1$ эта область моделирует загрязненную зону. Если движение жидкости в пласте и в трещине подчиняется линейному закону фильтрации, то распределение потенциала φ в каждой области определяется уравнением Лапласа

$$\Delta\varphi_i = 0; \quad \varphi_i = \frac{k_i h p_i}{\mu}, \quad (3.1)$$

где p_i – давление; μ – вязкость жидкости; индекс $i = 1$ соответствует внешней области, индекс $i = 2$ – трещине, индекс $i = 3$ – области, окружающей трещину. Перейдем к комплексной переменной $Z = re^{i\alpha}$ и комплексному потенциалу $\Phi = \varphi + i\psi$, где r – расстояние от источника; α – полярный угол, отсчитываемый от направления, определяемого большей осью трещины (см. рис. 3.1); ψ – функция тока рассматриваемого течения. Тогда общее решение рассматриваемой задачи представляется как

$$\Phi_1 = \frac{Q}{2\pi} \ln Z + k_1 \sum_{n=0}^{\infty} B_n Z^{-2n}; \quad \Phi_2 = \frac{Q}{2\pi} \ln Z + k_2 \sum_{n=0}^{\infty} D_n Z^{2n};$$

$$\Phi_3 = \frac{Q}{2\pi} \ln Z + k_3 \sum_{n=-\infty}^{\infty} G_n Z^{2n}. \quad (3.2)$$

Здесь B_n, D_n, G_n – произвольные вещественные коэффициенты.

Границы трещины и окружающей ее области в комплексной форме имеют вид

$$Z_2 = \frac{f}{2} \left(\frac{e^{ti}}{q} + \frac{q}{e^{ti}} \right) = \frac{f}{2q} e^{ti} (1 + q^2 e^{-2ti}); \quad q = \sqrt{\frac{1-w}{1+w}}; \quad 0 \leq t \leq 2\pi;$$

$$Z_1 = \frac{f}{2} \left(\frac{e^{ti}}{p} + \frac{p}{e^{ti}} \right) = \frac{f}{2p} e^{ti} (1 + p^2 e^{-2ti}); \quad p = \sqrt{\frac{a-b}{a+b}}. \quad (3.3)$$

На линии раздела областей давление и функция тока должны быть непрерывны [81, 85]. Таким образом, условия сопряжения решений (3.2) на границах (3.3)

$$\frac{1}{K_3} \operatorname{Re} \Phi_3(Z_j) = \frac{1}{K_j} \operatorname{Re} \Phi_j(Z_j); \quad \operatorname{Im} \Phi_3(Z_j) = \operatorname{Im} \Phi_j(Z_j); \quad j=1,2. \quad (3.4)$$

3.2. ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ

Вдоль линий (3.3) справедливы представления:

$$\begin{aligned} Z_2^{-2n} &= (f/2)^{-2n} q^{2n} e^{-2nti} (1 + q^2 e^{-2ti})^{-2n} = \\ &= (f/2)^{-2n} q^{2n} e^{-2nti} \left(\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k q^{2k} e^{-2kti} \right)^{2n}; \\ Z_1^{-2n} &= (f/2)^{-2n} p^{2n} e^{-2nti} (1 + p^2 e^{-2ti})^{-2n} = \\ &= (f/2)^{-2n} p^{2n} e^{-2nti} \left(\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k p^{2k} e^{-2kti} \right)^{2n}. \end{aligned}$$

Эти ряды сходятся, так как являются суммами геометрических прогрессий, знаменатели которых по модулю меньше единицы. Следовательно, ряды по отрицательным степеням Z_2 и Z_1 в уравнениях (3.4) могут быть представлены в виде

$$\sum_{n=1}^{\infty} B_n Z_1^{-2n} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n p^{2n} e^{-2nti}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} G_{-n} Z_1^{-2n} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n p^{2n} e^{-2nti},$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} G_{-n} Z_2^{-2n} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n q^{2n} e^{-2nti}. \quad (3.5)$$

Здесь A_n и E_n – вещественные коэффициенты. Ряды по положительным степеням Z_2 и Z_1 с учетом (3.3) преобразуются следующим образом:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} D_n Z_2^{2n} &= \sum_{n=1}^{\infty} D_n \left(\frac{f}{2}\right)^{2n} q^{-2n} e^{2nti} \left(\sum_{k=0}^{2n} C_{2n}^k q^{2(2n-k)} e^{-2t(2n-k)} \right) = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} D_n \left(\frac{f}{2}\right)^{2n} C_{2n}^n + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \sum_{k=n}^{\infty} D_k \left(\frac{f}{2}\right)^{2k} C_{2k}^{k-n} q^{-2n} \times \right. \\ &\times \left. \left[(1+q^{4n}) \cos 2nt + (1-q^{4n}) \sin 2nt \right] \right\}; \\ \sum_{n=1}^{\infty} G_n Z_2^{2n} &= \sum_{n=1}^{\infty} G_n \left(\frac{f}{2}\right)^{2n} q^{-2n} e^{2nti} \left(\sum_{k=0}^{2n} C_{2n}^k q^{2(2n-k)} e^{-2t(2n-k)} \right) = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} G_n \left(\frac{f}{2}\right)^{2n} C_{2n}^n + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \sum_{k=n}^{\infty} G_k \left(\frac{f}{2}\right)^{2k} C_{2k}^{k-n} q^{-2n} \times \right. \\ &\times \left. \left[(1+q^{4n}) \cos 2nt + (1-q^{4n}) \sin 2nt \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} G_n Z_1^{2n} &= \sum_{n=1}^{\infty} G_n \left(\frac{f}{2}\right)^{2n} p^{-2n} e^{2nti} \left(\sum_{k=0}^{2n} C_{2n}^k p^{2(2n-k)} e^{-2t(2n-k)} \right) = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} G_n \left(\frac{f}{2}\right)^{2n} C_{2n}^n + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \sum_{k=n}^{\infty} G_k \left(\frac{f}{2}\right)^{2k} C_{2k}^{k-n} p^{-2n} \times \right. \\ &\times \left. \left[(1+p^{4n}) \cos 2nt + (1-p^{4n}) \sin 2nt \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$C_m^k = \frac{m!}{k!(m-k)!}; \quad m! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot m. \quad (3.6)$$

Поскольку $|e^{-2ti} q^2| < 1$ и $|e^{-2ti} p^2| < 1$, вдоль кривых (3.3) справедливы разложения

$$\begin{aligned} \ln Z_2 &= \ln \frac{f}{2q} + i \text{tg} \sum_{n=1}^{\infty} q^{2n} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-2nti}; \\ \ln Z_1 &= \ln \frac{f}{2p} + i \text{tg} \sum_{n=1}^{\infty} p^{2n} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-2nti}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Подставляя выражения (3.5)–(3.7) в уравнения (3.4) и приравнивая соответствующие коэффициенты при $\sin 2nt$, $\cos 2nt$, $n = 1, 2, 3 \dots$ и свободные члены, получим

$$A_n = \frac{Q}{2\pi k_1} \frac{(-1)^n}{n} \left[1 - \frac{(1 + \lambda_1)(1 - \lambda_2)}{1 - q^{4n}\lambda_2 + p^{4n}\lambda_1(1 - q^{-4n}\lambda_2)} \right]; \quad (3.8)$$

$$E_n = \frac{Q}{2\pi k_3} \frac{(-1)^n}{n} \left[1 - \frac{(1 + \lambda_1 p^{4n})(1 - \lambda_2)}{1 - q^{4n}\lambda_2 + p^{4n}\lambda_1(1 - q^{-4n}\lambda_2)} \right]; \quad (3.9)$$

$$\sum_{k=n}^{\infty} G_k \left(\frac{f}{2} \right)^{2k} C_{2k}^{k-n} = \frac{Q}{2\pi k_3} \frac{(-1)^n}{n} \frac{\lambda_1(1 - \lambda_2)p^{4n}}{1 - q^{4n}\lambda_2 + p^{4n}\lambda_1(1 - q^{-4n}\lambda_2)}; \quad (3.10)$$

$$\sum_{k=n}^{\infty} D_k \left(\frac{f}{2} \right)^{2k} C_{2k}^{k-n} = \frac{Q}{2\pi k_2} \frac{(-1)^n}{n} \frac{\lambda_1 p^{4n} - \lambda_2 q^{4n}}{1 - q^{4n}\lambda_2 + p^{4n}\lambda_1(1 - q^{-4n}\lambda_2)}; \quad (3.11)$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} G_k \left(\frac{f}{2} \right)^{2k} C_{2k}^k = B_0 - G_0 - \frac{Q}{2\pi k_3} \frac{2\lambda_1}{1 + \lambda_1} \left(\ln \frac{f}{2} - \ln p \right); \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} D_k \left(\frac{f}{2} \right)^{2k} C_{2k}^k &= B_0 - D_0 + \frac{Q}{2\pi k_3} \left(\frac{2\lambda_2}{1 + \lambda_2} \left(\ln \frac{f}{2} - \ln q \right) - \right. \\ &\left. - \frac{2\lambda_1}{1 + \lambda_1} \left(\ln \frac{f}{2} - \ln p \right) \right); \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\lambda_1 = \frac{k_1 - k_3}{k_1 + k_3}; \quad \lambda_2 = \frac{k_2 - k_3}{k_2 + k_3}.$$

Любое значение $Z \neq 0$ может быть выражено следующим образом:

$$Z = \frac{f}{2} \left(v + \frac{1}{v} \right), \quad \text{где } v = \frac{Z}{f} - \sqrt{\frac{Z^2}{f^2} - 1}. \quad (3.14)$$

Так как $C_{2k}^{k-n} = C_{2k}^{k+n}$ при $n \leq k$ имеем

$$Z^{2k} = \sum_{n=0}^{2k} C_{2k}^n (f/2)^{2k} v^{2(k-n)} = \sum_{n=1}^k C_{2k}^{k-n} (f/2)^{2k} (v^{2n} + v^{-2n}) + C_{2k}^k (f/2)^{2k}. \quad (3.15)$$

С учетом (3.10)–(3.15) могут быть вычислены суммы рядов:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} G_k Z^{2k} &= \frac{Q}{2\pi k_3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n [v^{2n} + v^{-2n}]}{n} \times \\ &\times \frac{\lambda_1 (1 - \lambda_2) p^{4n}}{1 - q^{4n} \lambda_2 + p^{4n} \lambda_1 (1 - q^{-4n} \lambda_2)} + \\ &+ B_0 - G_0 - \frac{Q}{2\pi k_3} \frac{2\lambda_1}{1 + \lambda_1} \ln \frac{f}{2p}; \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} D_k Z^{2k} &= \frac{Q}{2\pi k_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n [v^{2n} + v^{-2n}]}{n} \times \\ &\times \frac{\lambda_1 p^{4n} - \lambda_2 q^{4n}}{1 - q^{4n} \lambda_2 + p^{4n} \lambda_1 (1 - q^{-4n} \lambda_2)} + \\ &+ B_0 - D_0 + \frac{Q}{2\pi k_3} \left[\frac{2\lambda_2}{1 + \lambda_2} \ln \frac{f}{2q} - \frac{2\lambda_1}{1 + \lambda_1} \ln \frac{f}{2p} \right]. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Сопоставляя выражения (3.3), (3.5) и (3.15) и учитывая равенства (3.8), (3.9), получим

$$\sum_{k=1}^{\infty} G_{-k} Z^{-2k} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n v^{2n} = \frac{Q}{2\pi k_3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n v^{2n}}{n} \times \left[1 - \frac{(1 - \lambda_2)(1 + \lambda_1 p^{4n})}{1 - q^{4n} \lambda_2 + p^{4n} \lambda_1 (1 - q^{-4n} \lambda_2)} \right]; \quad (3.18)$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} B_k Z^{-2k} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n v^{2n} = \frac{Q}{2\pi k_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n v^{2n}}{n} \times \left[1 - \frac{(1 - \lambda_2)(1 + \lambda_1)}{1 - q^{4n} \lambda_2 + p^{4n} \lambda_1 (1 - q^{-4n} \lambda_2)} \right]. \quad (3.19)$$

Подстановка соотношений (3.16)–(3.19) в уравнения (3.2) дает распределение комплексного потенциала точечного источника, расположенного в центре включений, границы которых являются конфокальными эллипсами:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{Q}{2\pi} \ln Z + k_1 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n v^{2n}}{n} \times \\ &\times \left[1 - \frac{(1 - \lambda_2)(1 + \lambda_1)}{1 - q^{4n} \lambda_2 + p^{4n} \lambda_1 (1 - q^{-4n} \lambda_2)} \right] = k_1 B_0 + \\ &+ \frac{Q}{2\pi} \left(\ln \frac{f}{2} - \ln v - (1 - \lambda_2)(1 + \lambda_1) \times \right. \\ &\times \left. \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n v^{2n}}{n (1 - q^{4n} \lambda_2 + p^{4n} \lambda_1 [1 - q^{-4n} \lambda_2])} \right); \\ \Phi_2 &= k_2 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n [v^{2n} + v^{-2n}]}{n} \times \\ &\times \frac{\lambda_1 p^{4n} - \lambda_2 q^{4n}}{1 - q^{4n} \lambda_2 + p^{4n} \lambda_1 (1 - q^{-4n} \lambda_2)} + \\ &+ \frac{Q}{2\pi} \ln Z + \frac{Q(1 + \lambda_2)}{2\pi(1 - \lambda_2)} \left[\frac{2\lambda_2}{1 + \lambda_2} \ln \frac{f}{2q} - \frac{2\lambda_1}{1 + \lambda_1} \ln \frac{f}{2p} \right], \quad (3.20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Phi_3 &= \frac{Q}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n(1 - q^{4n}\lambda_2 + p^{4n}\lambda_1[1 - q^{-4n}\lambda_2])} \times \\
&\times \left[v^{2n}(\lambda_2 - q^{4n}\lambda_2 + p^{4n}\lambda_1[1 - q^{-4n}\lambda_2]) + v^{-2n}\lambda_1(1 - \lambda_2)p^{4n} \right] + \\
&+ k_3 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \ln Z - \frac{Q}{2\pi} \frac{2\lambda_1}{1 + \lambda_1} \ln \frac{f}{2p} = \\
&= k_3 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \left[(1 - \lambda_2) \ln Z - \frac{2\lambda_1}{1 + \lambda_1} \ln \frac{f}{2p} + \lambda_2 \ln \frac{f}{2} - \lambda_2 \ln v \right] + \\
&+ \frac{Q}{2\pi} (1 - \lambda_2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \left[v^{-2n}\lambda_1 p^{4n} + v^{2n} (q^{4n}\lambda_2 + p^{4n}\lambda_1[1 - q^{-4n}\lambda_2]) \right]}{n(1 - q^{4n}\lambda_2 + p^{4n}\lambda_1[1 - q^{-4n}\lambda_2])}.
\end{aligned}$$

При любых соотношениях проницаемостей k_1, k_2 и k_3 $|\lambda_{1,2}| < 1$.
Если пласт однородный, то $k_1 = k_2 = k_3$, поэтому $\lambda_{1,2} = 0$,

$$\Phi = \frac{Q}{2\pi} \ln Z + \text{const}$$

Случай $\lambda_1 = 0$ или $\lambda_2 = 0$ соответствует трещине конечной проводимости в однородном пласте [37, 206]. При этом выражения (3.20) могут быть преобразованы к виду

$$\begin{aligned}
\Phi_1 &= k_1 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \left(\ln \frac{f}{2} - \ln v - (1 - \lambda) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n v^{2n}}{n(1 - q^{4n}\lambda)} \right) = k_1 B_0 + \\
&+ \frac{Q}{2\pi} \left(\ln \frac{f}{2} + (1 - \lambda) \ln \frac{2Z}{f} - \lambda \ln v + (1 - \lambda) \sum_{m=1}^{\infty} \lambda^m \ln [1 + q^{4m} v^2] \right); \\
\Phi_2 &= k_2 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} [v^{2n} + v^{-2n}]}{n} \frac{\lambda q^{4n}}{1 - q^{4n}\lambda} + \\
&+ \frac{Q}{2\pi} \left(\ln Z + \frac{2\lambda}{1 - \lambda} \ln \frac{f}{2q} \right) = k_2 B_0 + \\
&+ \frac{Q}{2\pi} \left(\ln Z + \frac{2\lambda}{1 - \lambda} \ln \frac{f}{2q} + \sum_{m=1}^{\infty} \lambda^m \ln \left[1 + q^{8m} + q^{4m} \left(\frac{4Z^2}{f^2} - 2 \right) \right] \right); \quad (3.21)
\end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{k_2 - k_1}{k_2 + k_1}.$$

Если включение имеет бесконечную проводимость, что соответствует идеальной трещине, то $k_2 \rightarrow \infty$, $\lambda_2 = 1$. При этом давление в трещине постоянно и решение (3.20) совпадает с полученным в [206] для описания притока к идеальной трещине, окруженной загрязненной зоной эллиптической формы:

$$\Phi_1 = k_1 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \left(\ln \frac{f}{2} + \ln \left[\frac{Z}{f} + \sqrt{\frac{Z^2}{f^2} - 1} \right] \right);$$

$$\Phi_3 = k_3 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{1 - \lambda_1}{1 + \lambda_1} \ln \frac{f}{2} + \frac{2\lambda_1}{1 + \lambda_1} \ln p + \ln \left[\frac{Z}{f} + \sqrt{\frac{Z^2}{f^2} - 1} \right] \right).$$

Если $k_3 \gg k_2$, $\lambda_2 = -1$, то постоянно давление вне включения, контур которого является эквипотенциалью. Потенциал точечного источника, расположенного в центре пласта с эллиптическим контуром питания, согласно (3.20), имеет вид

$$\Phi_2 = k_2 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \left\{ \ln \frac{2Zq}{f} + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \ln \left[1 + q^{8m} + q^{4m} \left(\frac{4Z^2}{f^2} - 2 \right) \right] \right\}.$$

Отсюда после преобразований [18] может быть получена формула притока к скважине, расположенной в центре эллиптического пласта [81]:

$$P_c - P_w = \frac{Q}{2\pi k_2 h} \left(\ln \frac{f}{r_w} - \ln \frac{2K}{\pi} - \ln \sqrt{k^*} \right); \quad q^4 = \exp \left(-\pi \frac{K'}{K} \right).$$

Здесь K – полный эллиптический интеграл с модулем k^* ; p_c и p_w – значения давления на контуре питания и на скважине соответственно.

При $\lambda_1 = -1$, $k_3 \rightarrow \infty$ решение (3.20) для внешней области описывает распределение потенциала идеальной трещины [81].

При $\lambda_1 = 1$, $k_1 \rightarrow \infty$ давление во внешней области постоянно, контур большого эллипса является эквипотенциалью. В этом случае решение (3.20) описывает распределение потенциала трещины конечной проводимости, расположенной в центре пласта с эллиптическим контуром питания, конфокальным границе трещины. В частности, при $p \rightarrow \infty$ контур является удаленным, и решение задачи с точностью до константы совпадает с (3.21).

3.3. ПРИТОК К ОДИНОЧНОЙ ТРЕЩИНЕ КОНЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В ЦЕНТРЕ КРУГОВОГО ПЛАСТА С УДАЛЕННЫМ КОНТУРОМ ПИТАНИЯ

Пусть $r_w \ll f$ – радиус скважины, $R_c \gg f$ – радиус удаленного контура питания, на котором задано постоянное давление p_c .

При $Z_w = r_w e^{i\alpha}$, где $|Z_w| = r_w \ll cd$, распределение (3.20) имеет вид:

$$\Phi_3 \approx k_3 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \left[(1 - \lambda_2) i \alpha + \lambda_2 i \frac{\pi}{2} + \frac{1 - \lambda_1}{1 + \lambda_1} \ln r_e \right];$$

$$\ln r_e = \frac{1 + \lambda_1}{1 - \lambda_1} \cdot \left[(1 - \lambda_2) \ln r_w - \frac{2\lambda_1}{1 + \lambda_1} \ln \frac{f}{2p} + \right.$$

$$\left. + \lambda_2 \ln \frac{f}{2} + (1 - \lambda_2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\lambda_1 p^{4n} - q^{4n} \lambda_2 + p^{4n} \lambda_1 [1 - q^{-4n} \lambda_2])}{n(1 - q^{4n} \lambda_2 + p^{4n} \lambda_1 [1 - q^{-4n} \lambda_2])} \right]. \quad (3.22)$$

Здесь r_e – эффективный радиус скважины, пересеченной трещиной гидроразрыва.

Таким образом, в достаточно малой окрестности источника давление практически не зависит от полярного угла α :

$$P_w \approx \frac{\mu B_0}{h} + \frac{Q \mu}{2\pi k_1 h} \ln r_e. \quad (3.23)$$

Значения потенциала и давления на удаленном контуре $Z_c = R_c e^{i\alpha}$ определяются выражениями

$$\Phi_1 \approx k_1 B_0 + \frac{Q}{2\pi} \ln Z_c; \quad p_c \approx \frac{\mu B_0}{h} + \frac{Q\mu}{2\pi k_1 h} \ln R_c. \quad (3.24)$$

Вычитая давление (3.23) из (3.24), получим формулу притока к одиночной трещине конечной проводимости от удаленного контура:

$$Q = Q_0 \frac{\ln R_c / r_w}{\ln R_c / r_e}. \quad (3.25)$$

Здесь Q_0 – приток к скважине без трещины:

$$Q_0 = \frac{2\pi k_1 h}{\mu} \frac{p_c - p_w}{\ln R_c / r_w}. \quad (3.26)$$

В случае, когда $\lambda_1 = 0$, т.е. загрязненная зона вокруг трещины отсутствует,

$$Q = Q_0 \frac{\ln R_c / r_w}{(1 - \lambda_2) \ln R_c / r_w + \lambda_2 \ln 2R_c / f - (1 - \lambda_2) \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_2^n \ln(1 - q^{4n})}. \quad (3.27)$$

Если трещина имеет бесконечную проводимость, т.е. $\lambda_2 = 1$, формула (3.25) принимает вид

$$Q = Q_0 \frac{\ln R_c / r_w}{\ln 2R_c / f - 2\lambda_1 / (1 - \lambda_1) \ln p}.$$

Если вокруг скважины без трещины имеется загрязненная зона радиуса b , то приток определяется выражением

$$Q_{0d} = Q_0 \frac{\ln R_c / r_w}{\ln R_c / r_w + 2\lambda_1 / (1 - \lambda_1) \ln b / r_w}. \quad (3.28)$$

3.4. РАСЧЕТЫ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ЗОНЫ НА ДЕБИТ СКВАЖИНЫ, ПЕРЕСЕЧЕННОЙ ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА

Анализ влияния загрязнения призабойной зоны на производительность скважин после гидравлического разрыва проводится на основе полученных выше соотношений.

В табл. 3.1–3.4 приведены значения безразмерного дебита Q/Q_0 в зависимости от полудлины трещины l , отношения проницаемостей пласта и трещины k_2/k_1 и параметров загрязненной зоны: величины b , определяющей размеры загрязнения, и отношения k_3/k_1 , определяющего его проводимость. В расчетах принято, что радиус контура $R_c = 500$ м, половина раскрытия трещины $w = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

Графики безразмерного дебита скважины в зависимости от длины трещины гидроразрыва в пластах разной проницаемости приведены на рис. 3.2–3.4. Эти результаты показывают, что увеличение длины трещины не приводит к неограниченному росту дебита скважины, что подтверждает существование предельной длины трещины. Чем больше различаются проницаемости пласта и трещины, тем выше это предельное значение, т.е. в менее проницаемых пластах эффективны более длинные трещины. Влияние параметров загрязненной зоны на величину дебита наиболее существенно в случае коротких трещин, а также в высокопроницаемых пластах.

На рис. 3.5, 3.6 показано изменение дебита скважин в зависимости от размера b загрязненной зоны при различных длинах трещины гидроразрыва. Графики построены для пласта с проницаемостью $0,01 \text{ мкм}^2$ при проницаемости трещины 50 мкм^2 . Рис. 3.5 соответствует случаю, когда проницаемость загрязненной зоны в 10 раз ниже проницаемости пласта, а рис. 3.6 – случаю, когда эти величины различаются в 2 раза. Наиболее существенно влияние размера загрязненной зоны на коэффициент продуктивности скважины до гидроразрыва: загрязнение радиусом 1 м при $k_3/k_1 = 0,1$ приводит к снижению дебита скважины

Безразмерный дебит жидкости Q/Q_0 после операции гидроразрыва в пласте со сверхнизкой проницаемостью ($\sim 10^{-4}$ мкм²)

k_2/k_1	$l, \text{ м}$	$b = 0 \text{ м},$ $k_3/k_1 = 1$	$b = 0,1 \text{ м}$			$b = 0,5 \text{ м}$		
			$k_3/k_1 = 0,1$	$k_3/k_1 = 0,2$	$k_3/k_1 = 0,5$	$k_3/k_1 = 0,1$	$k_3/k_1 = 0,2$	$k_3/k_1 = 0,5$
10^5	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,98	1,94	1,97	1,98	1,81	1,90	1,96
	20	2,31	2,28	2,30	2,30	2,18	2,25	2,29
	50	2,89	2,87	2,88	2,89	2,81	2,86	2,88
	100	3,47	3,45	3,47	3,47	3,40	3,44	3,46
	200	4,14	4,12	4,14	4,14	4,07	4,12	4,14
$2,5 \cdot 10^5$	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,99	1,96	1,98	1,99	1,82	1,91	1,97
	20	2,34	2,31	2,32	2,33	2,21	2,28	2,32
	50	3,00	2,98	2,99	2,99	2,91	2,96	2,99
	100	3,75	3,74	3,74	3,75	3,69	3,72	3,74
	200	4,86	4,86	4,84	4,85	4,81	4,82	4,85
$5 \cdot 10^5$	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	2,00	1,96	1,98	1,99	1,82	1,91	1,98
	20	2,34	2,32	2,33	2,34	2,22	2,29	2,33
	50	3,03	3,01	3,03	3,03	2,94	3,00	3,02
	100	3,87	3,85	3,86	3,86	3,79	3,84	3,86
	200	5,23	5,19	5,23	5,22	5,14	5,21	5,21
10^6	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	2,00	1,96	1,98	1,99	1,82	1,92	1,98
	20	2,35	2,32	2,34	2,35	2,22	2,29	2,33
	50	3,05	3,04	3,04	3,05	2,97	3,01	3,04
	100	3,93	3,92	3,92	3,93	3,86	3,89	3,92
	200	5,45	5,47	5,44	5,45	5,41	5,41	5,44

..... 3.7

k_2/k_1	$l, \text{ м}$	$b = 0 \text{ м},$ $k_3/k_1 = 1$	$b = 1 \text{ м}$			$b = 2 \text{ м}$			$b = 5 \text{ м}$		
			$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$	$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$	$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$
10^5	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,98	1,66	1,83	1,94	1,43	1,69	1,90	1,03	1,40	1,80
	20	2,31	2,07	2,20	2,28	1,88	2,10	2,25	1,48	1,85	2,17
	50	2,89	2,73	2,82	2,87	2,59	2,75	2,85	2,25	2,56	2,80
	100	3,47	3,34	3,41	3,46	3,23	3,36	3,44	2,94	3,21	3,40
	200	4,14	4,02	4,09	4,13	3,92	4,04	4,11	3,66	3,90	4,07
$2,5 \cdot 10^5$	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,99	1,67	1,83	1,95	1,44	1,70	1,91	1,03	1,41	1,80
	20	2,34	2,10	2,22	2,31	1,90	2,12	2,28	1,49	1,87	2,20
	50	3,00	2,83	2,92	2,98	2,68	2,85	2,96	2,32	2,65	2,90
	100	3,75	3,62	3,69	3,73	3,50	3,63	3,72	3,17	3,46	3,67
	200	4,86	4,75	4,79	4,84	4,64	4,74	4,83	4,33	4,59	4,78
$5 \cdot 10^5$	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	2,00	1,67	1,84	1,95	1,44	1,70	1,91	1,03	1,41	1,81
	20	2,34	2,10	2,23	2,32	1,91	2,13	2,29	1,50	1,87	2,21
	50	3,03	2,86	2,96	3,01	2,71	2,88	2,99	2,34	2,68	2,94
	100	3,87	3,72	3,81	3,85	3,59	3,74	3,83	3,25	3,57	3,79
	200	5,23	5,07	5,18	5,20	4,95	5,12	5,19	4,61	4,95	5,14
10^6	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	2,00	1,67	1,84	1,96	1,44	1,70	1,92	1,03	1,41	1,81
	20	2,35	2,11	2,24	2,32	1,91	2,13	2,29	1,50	1,88	2,21
	50	3,05	2,88	2,97	3,03	2,73	2,90	3,01	2,35	2,70	2,96
	100	3,93	3,79	3,86	3,91	3,66	3,80	3,90	3,30	3,62	3,85
	200	5,45	5,34	5,38	5,43	5,20	5,32	5,42	4,83	5,14	5,37

Примечание. Здесь и в табл. 3.2–3.4 l – полу длина трещины; b – размер загрязненной зоны; k_2/k_1 – отношение проницаемости трещины к проницаемости пласта; k_3/k_1 – отношение проницаемости загрязненной зоны к проницаемости пласта.

Безразмерный дебит жидкости Q/Q_0 после операции гидроразрыва в пласте с низкой проницаемостью ($\sim 10^{-2}$ мкм²)

k_2/k_1	$l, \text{ м}$	$b = 0 \text{ м},$ $k_3/k_1 = 1$	$b = 0,1 \text{ м}$			$b = 0,5 \text{ м}$		
			$k_3/k_1 = 0,1$	$k_3/k_1 = 0,2$	$k_3/k_1 = 0,5$	$k_3/k_1 = 0,1$	$k_3/k_1 = 0,2$	$k_3/k_1 = 0,5$
10^3	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,47	1,39	1,42	1,45	1,23	1,32	1,41
	20	1,49	1,41	1,44	1,47	1,25	1,34	1,43
	50	1,50	1,42	1,46	1,49	1,26	1,35	1,44
	100	1,51	1,42	1,46	1,49	1,26	1,36	1,45
	200	1,51	1,43	1,46	1,49	1,26	1,36	1,45
$2,5 \cdot 10^3$	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,64	1,59	1,62	1,64	1,46	1,54	1,61
	20	1,70	1,65	1,68	1,69	1,53	1,60	1,67
	50	1,74	1,69	1,72	1,74	1,57	1,64	1,71
	100	1,76	1,71	1,73	1,75	1,58	1,66	1,72
	200	1,77	1,72	1,74	1,76	1,59	1,66	1,73
$5 \cdot 10^3$	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,76	1,72	1,75	1,76	1,60	1,68	1,74
	20	1,88	1,84	1,86	1,87	1,74	1,80	1,85
	50	1,97	1,93	1,95	1,96	1,83	1,90	1,94
	100	2,01	1,97	1,99	2,00	1,87	1,93	1,98
	200	2,03	1,99	2,01	2,02	1,89	1,95	2,00
10^4	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,86	1,82	1,84	1,85	1,69	1,78	1,84
	20	2,04	2,01	2,02	2,03	1,91	1,98	2,02
	50	2,22	2,19	2,21	2,22	2,12	2,17	2,20
	100	2,31	2,28	2,30	2,31	2,20	2,26	2,29
	200	2,37	2,34	2,35	2,36	2,26	2,31	2,35

..... 3.2

k_2/k_1	$l, \text{ м}$	$b = 0 \text{ м},$ $k_3/k_1 = 1$	$b = 1 \text{ м}$			$b = 2 \text{ м}$			$b = 5 \text{ м}$		
			$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$	$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$	$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$
10^3	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,47	1,11	1,25	1,38	0,97	1,14	1,34	0,75	0,97	1,26
	20	1,49	1,14	1,26	1,40	1,00	1,16	1,35	0,80	1,00	1,27
	50	1,50	1,14	1,27	1,41	1,01	1,17	1,36	0,81	1,00	1,27
	100	1,51	1,15	1,27	1,41	1,01	1,17	1,36	0,81	1,00	1,27
	200	1,51	1,15	1,28	1,41	1,01	1,17	1,36	0,81	1,00	1,27
$2,5 \cdot 10^3$	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,64	1,34	1,47	1,59	1,18	1,37	1,55	0,88	1,16	1,46
	20	1,70	1,43	1,54	1,64	1,29	1,45	1,60	1,05	1,27	1,53
	50	1,74	1,47	1,58	1,68	1,33	1,48	1,64	1,11	1,31	1,56
	100	1,76	1,48	1,59	1,70	1,34	1,49	1,65	1,12	1,32	1,57
	200	1,77	1,48	1,60	1,70	1,35	1,50	1,66	1,12	1,32	1,57
$5 \cdot 10^3$	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,76	1,48	1,61	1,72	1,29	1,50	1,68	0,95	1,26	1,59
	20	1,88	1,64	1,75	1,83	1,49	1,66	1,80	1,21	1,47	1,73
	50	1,97	1,74	1,84	1,92	1,62	1,76	1,89	1,38	1,59	1,82
	100	2,01	1,78	1,88	1,96	1,65	1,79	1,93	1,42	1,62	1,85
	200	2,03	1,80	1,89	1,98	1,66	1,81	1,94	1,43	1,63	1,87
10^4	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,86	1,56	1,71	1,82	1,36	1,59	1,78	0,99	1,33	1,69
	20	2,04	1,82	1,92	2,00	1,66	1,84	1,97	1,33	1,63	1,90
	50	2,22	2,04	2,12	2,19	1,92	2,05	2,16	1,67	1,89	2,10
	100	2,31	2,13	2,21	2,28	2,01	2,14	2,25	1,77	1,98	2,19
	200	2,37	2,18	2,26	2,33	2,05	2,18	2,30	1,82	2,02	2,23

..... 3.3

Безразмерный дебит жидкости Q/Q_0 после операции гидроразрыва в пласте со средней проницаемостью ($\sim 10^{-1}$ мкм²)

k_2/k_1	$l, \text{ м}$	$b = 0, \text{ м},$ $k_3/k_1 = 1$	$b = 0,1 \text{ м}$			$b = 0,5 \text{ м}$		
			$k_3/k_1 = 0,1$	$k_3/k_1 = 0,2$	$k_3/k_1 = 0,5$	$k_3/k_1 = 0,1$	$k_3/k_1 = 0,2$	$k_3/k_1 = 0,5$
100	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97
	20	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97
	50	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97
	100	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97
	200	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97
250	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,22	1,08	1,14	1,19	0,87	0,99	1,13
	20	1,23	1,08	1,14	1,20	0,88	0,99	1,13
	50	1,23	1,08	1,14	1,20	0,88	0,99	1,13
	100	1,23	1,08	1,14	1,20	0,88	0,99	1,13
	200	1,23	1,08	1,14	1,20	0,88	0,99	1,13
500	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,34	1,23	1,28	1,32	1,05	1,15	1,27
	20	1,35	1,24	1,28	1,32	1,05	1,16	1,27
	50	1,35	1,24	1,29	1,33	1,06	1,16	1,28
	100	1,36	1,24	1,29	1,33	1,06	1,16	1,28
	200	1,36	1,25	1,29	1,33	1,06	1,16	1,28
1000	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,47	1,39	1,42	1,45	1,23	1,32	1,41
	20	1,49	1,41	1,44	1,47	1,25	1,34	1,43
	50	1,50	1,42	1,46	1,49	1,26	1,35	1,44
	100	1,51	1,42	1,46	1,49	1,26	1,36	1,45
	200	1,51	1,43	1,46	1,49	1,26	1,36	1,45

..... 3.3

k_2/k_1	$l, \text{ м}$	$b = 0 \text{ м},$ $k_3/k_1 = 1$	$b = 1 \text{ м}$			$b = 2 \text{ м}$			$b = 5 \text{ м}$		
			$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$	$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$	$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$
100	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,10	0,57	0,71	0,93	0,48	0,63	0,88	0,38	0,53	0,82
	20	1,10	0,57	0,71	0,92	0,48	0,63	0,88	0,37	0,53	0,82
	50	1,10	0,57	0,71	0,92	0,47	0,63	0,88	0,37	0,52	0,81
	100	1,10	0,57	0,71	0,92	0,47	0,63	0,87	0,37	0,52	0,81
	200	1,10	0,57	0,71	0,92	0,47	0,63	0,87	0,37	0,52	0,81
	250	1,10	0,57	0,71	0,92	0,47	0,63	0,87	0,37	0,52	0,81
250	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,22	0,76	0,90	1,08	0,64	0,80	1,04	0,50	0,68	0,97
	20	1,23	0,76	0,90	1,09	0,64	0,80	1,03	0,50	0,67	0,96
	50	1,23	0,76	0,90	1,09	0,64	0,80	1,03	0,50	0,67	0,96
	100	1,23	0,76	0,90	1,09	0,64	0,80	1,03	0,50	0,67	0,96
	200	1,23	0,76	0,90	1,09	0,64	0,80	1,03	0,50	0,67	0,96
	500	1,23	0,76	0,90	1,09	0,64	0,80	1,03	0,50	0,67	0,96
500	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,34	0,93	1,07	1,23	0,80	0,96	1,18	0,62	0,82	1,10
	20	1,35	0,94	1,07	1,23	0,81	0,97	1,18	0,64	0,82	1,10
	50	1,35	0,94	1,07	1,23	0,81	0,97	1,18	0,63	0,81	1,10
	100	1,36	0,94	1,07	1,24	0,81	0,97	1,18	0,63	0,81	1,10
	200	1,36	0,94	1,07	1,24	0,81	0,97	1,18	0,63	0,81	1,10
	1000	1,36	0,94	1,07	1,24	0,81	0,97	1,18	0,63	0,81	1,10
1000	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,47	1,11	1,25	1,38	0,97	1,14	1,34	0,75	0,97	1,26
	20	1,49	1,14	1,26	1,40	1,00	1,16	1,35	0,80	1,00	1,27
	50	1,50	1,14	1,27	1,41	1,01	1,17	1,36	0,81	1,00	1,27
	100	1,51	1,15	1,27	1,41	1,01	1,17	1,36	0,81	1,00	1,27
	200	1,51	1,15	1,28	1,41	1,01	1,17	1,36	0,81	1,00	1,27
	1000	1,51	1,15	1,28	1,41	1,01	1,17	1,36	0,81	1,00	1,27

..... 3.4

Безразмерный дебит жидкости Q/Q_0 после операции гидроразрыва в пласте с высокой проницаемостью ($\sim 1 \text{ мкм}^2$)

k_2/k_1	$l, \text{ м}$	$b = 0 \text{ м},$ $k_3/k_1 = 1$	$b = 0,1 \text{ м}$			$b = 0,5 \text{ м}$		
			$k_3/k_1 = 0,1$	$k_3/k_1 = 0,2$	$k_3/k_1 = 0,5$	$k_3/k_1 = 0,1$	$k_3/k_1 = 0,2$	$k_3/k_1 = 0,5$
10	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,00	0,51	0,62	0,78	0,34	0,47	0,70
	20	1,00	0,51	0,62	0,78	0,34	0,47	0,70
	50	1,00	0,51	0,62	0,78	0,34	0,47	0,70
	100	1,00	0,51	0,62	0,78	0,34	0,47	0,70
	200	1,00	0,51	0,62	0,78	0,34	0,47	0,70
25	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,00	0,64	0,74	0,87	0,45	0,58	0,78
	20	1,00	0,64	0,74	0,87	0,45	0,58	0,78
	50	1,00	0,64	0,74	0,87	0,45	0,58	0,78
	100	1,00	0,64	0,74	0,87	0,45	0,58	0,78
	200	1,00	0,64	0,74	0,87	0,45	0,58	0,78
50	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,02	0,76	0,85	0,95	0,55	0,68	0,87
	20	1,02	0,76	0,85	0,95	0,55	0,68	0,87
	50	1,02	0,76	0,85	0,95	0,55	0,68	0,87
	100	1,02	0,76	0,85	0,95	0,55	0,68	0,87
	200	1,02	0,76	0,85	0,95	0,55	0,68	0,87
100	0	1,00	0,60	0,77	0,93	0,31	0,50	0,80
	10	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97
	20	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97
	50	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97
	100	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97
	200	1,10	0,89	0,97	1,05	0,67	0,80	0,97

..... 3.4

k_2/k_1	$l, \text{ м}$	$b = 0 \text{ м},$ $k_3/k_1 = 1$	$b = 1 \text{ м}$			$b = 2 \text{ м}$			$b = 5 \text{ м}$		
			$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$	$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$	$k_3/k_1=0,1$	$k_3/k_1=0,2$	$k_3/k_1=0,5$
10	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,00	0,29	0,42	0,67	0,25	0,38	0,64	0,21	0,33	0,61
	20	1,00	0,29	0,42	0,67	0,25	0,38	0,64	0,20	0,33	0,60
	50	1,00	0,29	0,42	0,67	0,25	0,38	0,63	0,20	0,33	0,60
	100	1,00	0,29	0,42	0,67	0,25	0,38	0,63	0,20	0,33	0,60
	200	1,00	0,29	0,42	0,67	0,25	0,38	0,63	0,20	0,33	0,60
25	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,00	0,37	0,51	0,75	0,31	0,45	0,71	0,25	0,39	0,67
	20	1,00	0,37	0,51	0,74	0,31	0,45	0,71	0,25	0,39	0,67
	50	1,00	0,37	0,51	0,74	0,31	0,45	0,71	0,25	0,39	0,66
	100	1,00	0,37	0,51	0,74	0,31	0,45	0,71	0,25	0,39	0,66
	200	1,00	0,37	0,51	0,74	0,31	0,45	0,71	0,25	0,39	0,66
50	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,02	0,46	0,60	0,83	0,38	0,53	0,79	0,31	0,45	0,74
	20	1,02	0,46	0,60	0,82	0,38	0,53	0,78	0,30	0,45	0,73
	50	1,02	0,46	0,60	0,82	0,38	0,53	0,78	0,30	0,45	0,73
	100	1,02	0,46	0,60	0,82	0,38	0,53	0,78	0,30	0,45	0,73
	200	1,02	0,46	0,60	0,82	0,38	0,53	0,78	0,30	0,44	0,73
100	0	1,00	0,25	0,43	0,75	0,22	0,38	0,71	0,18	0,33	0,67
	10	1,10	0,57	0,71	0,93	0,48	0,63	0,88	0,38	0,53	0,82
	20	1,10	0,57	0,71	0,92	0,48	0,63	0,88	0,37	0,53	0,82
	50	1,10	0,57	0,71	0,92	0,47	0,63	0,88	0,37	0,52	0,81
	100	1,10	0,57	0,71	0,92	0,47	0,63	0,87	0,37	0,52	0,81
	200	1,10	0,57	0,71	0,92	0,47	0,63	0,87	0,37	0,52	0,81

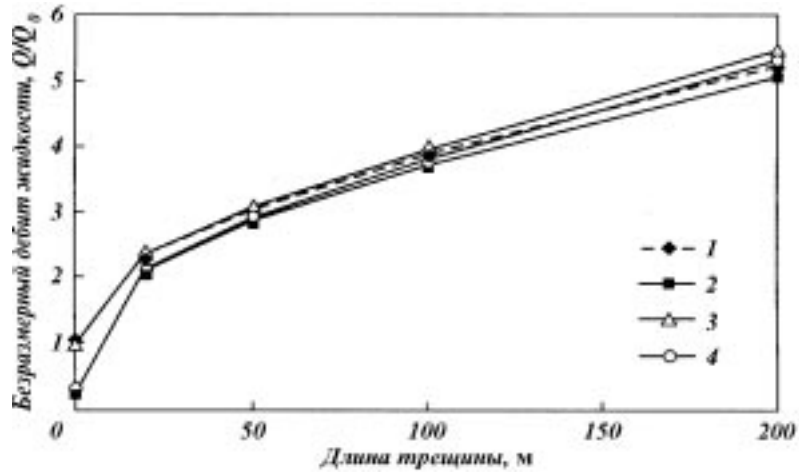


Рис. 3.2. Графики зависимости безразмерного дебита жидкости от длины трещины для пласта с проницаемостью 10^{-4} мкм²:
 1 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = k_1$; 2 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = 0,1k_1$, $b = 1$ м; 3 – $k_2 = 100$ мкм², $k_3 = k_1$;
 4 – $k_2 = 100$ мкм², $k_3 = 0,1k_1$, $b = 1$ м

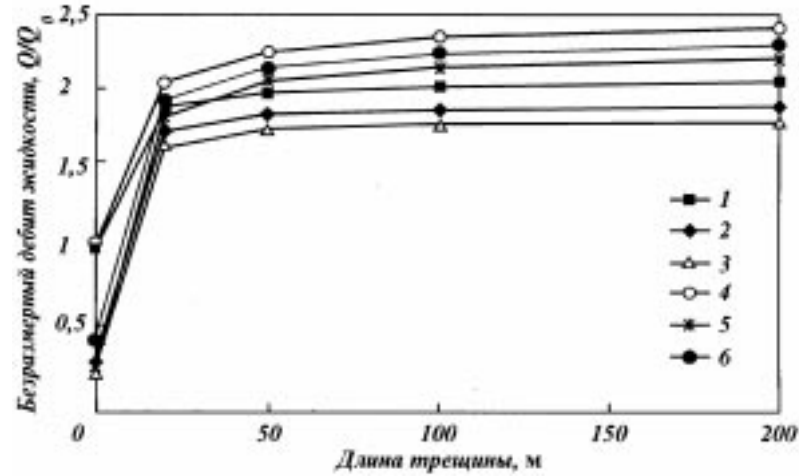


Рис. 3.3. Графики зависимости безразмерного дебита жидкости от длины трещины для пласта с проницаемостью $0,01$ мкм²:
 1 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = k_1$; 2 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = 0,1k_1$, $b = 0,5$ м; 3 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = 0,1k_1$, $b = 1$ м; 4 – $k_2 = 100$ мкм², $k_3 = k_1$; 5 – $k_2 = 100$ мкм², $k_3 = 0,1k_1$, $b = 1$ м; 6 – $k_2 = 100$ мкм², $k_3 = 0,2k_1$, $b = 1$ м

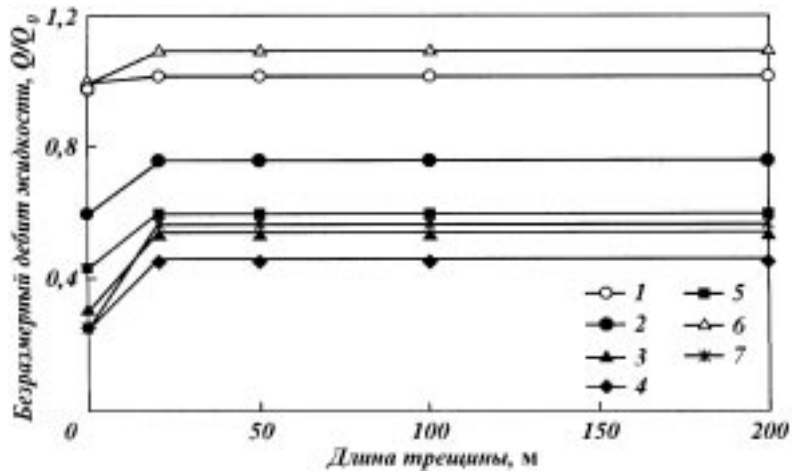


Рис. 3.4. Графики зависимости безразмерного дебита жидкости от длины трещины для пласта с проницаемостью 1 мкм²: 1 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = k_1$; 2 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = 0,1k_1$, $b = 0,1$ м; 3 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = 0,1k_1$, $b = 0,5$ м; 4 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = 0,1k_1$, $b = 1$ м; 5 – $k_2 = 50$ мкм², $k_3 = 0,2k_1$, $b = 1$ м; 6 – $k_2 = 100$ мкм², $k_3 = k_1$; 7 – $k_2 = 100$ мкм², $k_3 = 0,1k_1$, $b = 1$ м

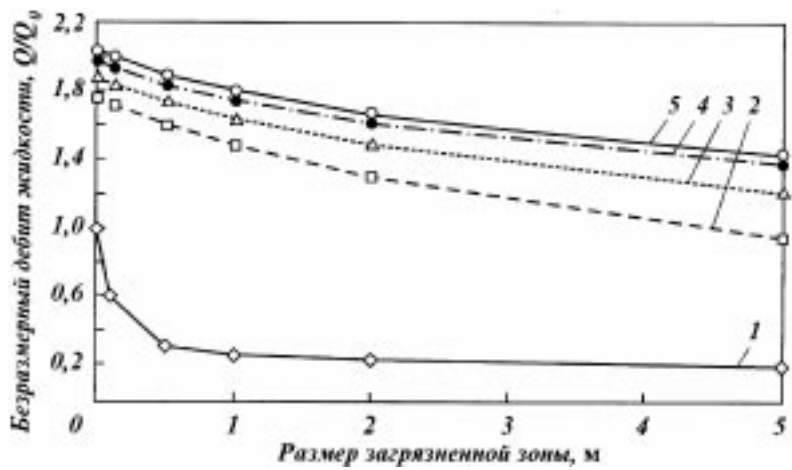


Рис. 3.5. Зависимость безразмерного дебита скважины после гидроразрыва от размеров загрязненной зоны при проницаемостях: пласта – 0,01 мкм², трещины – 50 мкм², загрязненной зоны – 0,001 мкм². Полуудлины трещины l , м: 1 – 0, 2 – 10, 3 – 20, 4 – 50, 5 – 200



Рис. 3.6. Зависимость безразмерного дебита скважины после гидроразрыва от размеров загрязненной зоны при проницаемостях: пласта – $0,01 \text{ мкм}^2$, трещины – 50 мкм^2 , загрязненной зоны – $0,005 \text{ мкм}^2$.
Полудлина трещины l , м: 1 – 0, 2 – 10, 3 – 20, 4 – 50, 5 – 200

в 4 раза, тогда как при наличии трещины ГРП с полудлиной 20 м аналогичное загрязнение вызвало бы снижение дебита всего на 12 %.

Во многих реальных ситуациях наличие вокруг эллиптической трещины конфокальной загрязненной зоны лишь незначительно влияет на величину дебита. Если скважина окружена естественной или искусственно созданной областью пониженной проницаемости, создание трещины гидроразрыва позволяет практически и исключить влияние этой области на приток флюида в скважину.

Для оценки влияния на коэффициент продуктивности скважин скин-эффекта, обусловленного снижением проводимости трещины, например, из-за появления "пробок" вблизи забоя, построены зависимости безразмерного дебита Q/Q_0 от проницаемости трещины при фиксированной длине трещины и проницаемости пласта (рис. 3.7, 3.8). При проницаемости пласта $0,01 \text{ мкм}^2$ и полудлине трещины 100 м снижение проницаемости всей трещины со 100 до 50 мкм^2 приводит к снижению дебита всего на 13 %, а снижение проницаемости трещины до 10 мкм^2 , т.е. в 10 раз, приводит к падению дебита на 34 %. В более проницаемых пластах этот эффект еще менее существенный:

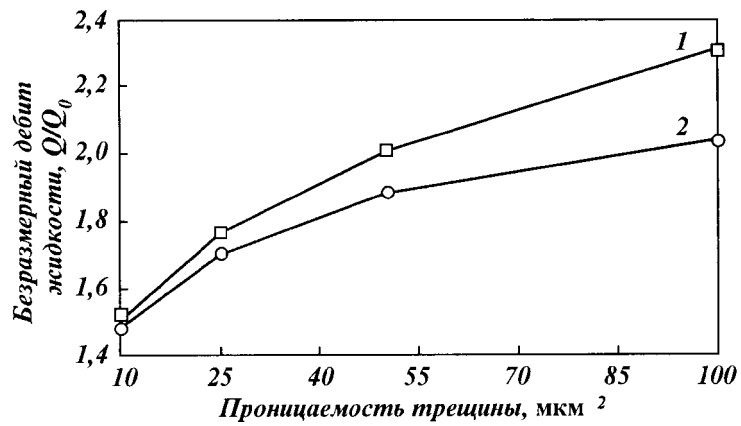


Рис. 3.7. Графики зависимости безразмерного дебита скважины после гидро-разрыва от проницаемости трещины для пласта с проницаемостью 0,01 мкм². Полу-длина трещины l , м: 1 – 100, 2 – 20

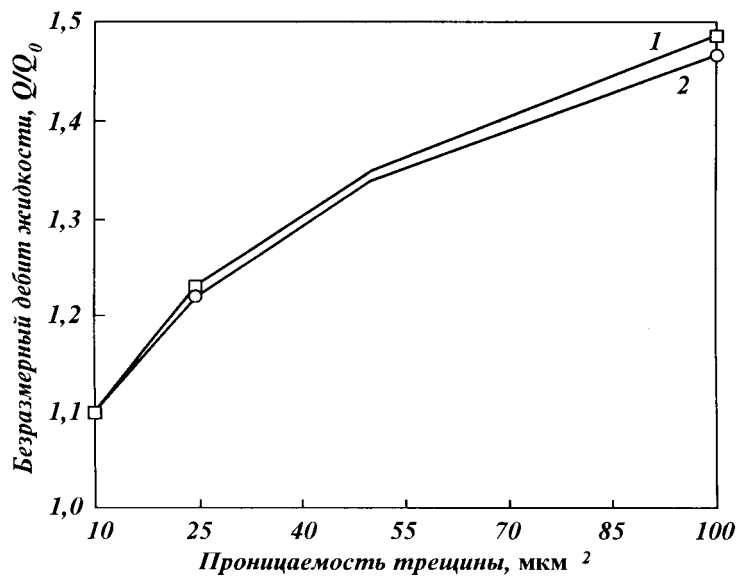


Рис. 3.8. Графики зависимости безразмерного дебита скважины после гидро-разрыва от проницаемости трещины для пласта с проницаемостью 0,1 мкм². Полу-длина трещины l , м: 1 – 20, 2 – 10

так, при проницаемости пласта $0,1 \text{ мкм}^2$ и полудлине трещины 20 м снижение проницаемости трещины со 100 до 10 мкм^2 приводит к падению дебита всего на 25 %, причем с увеличением длины трещины этот результат практически не изменяется.

Проведенные расчеты показывают, что гидроразрыв позволяет значительно уменьшить влияние загрязнения призабойной зоны скважины на ее дебит. Влияние загрязнения в трещине и вокруг нее во многих реальных ситуациях при соответствующем подборе параметров трещины гидроразрыва оказывается практически несущественным.