

УДК 532.546

© 1994 г. В. В. МУРЗЕНКО

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПЛАСТАХ С ТРЕЩИНАМИ ГИДРОРАЗРЫВА

Рассмотрена плоская стационарная фильтрация однородной жидкости между несколькими скважинами на участке пласта с трещинами гидроразрыва. В предположении бесконечной гидравлической проводимости трещин получены аналитические решения уравнения Лапласа для распределения давления в элементах нескольких типичных симметричных расстановок скважин, позволяющие сравнить их между собой. Поскольку гидравлическая проводимость трещины может оказать существенное влияние на поток, численно исследовано влияние ее гидравлических свойств на продуктивность эксплуатационной скважины.

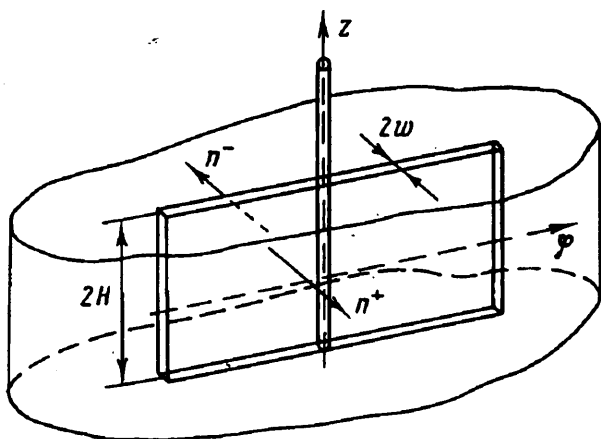
Приток жидкости к одиночной скважине, на которой создана трещина гидроразрыва, выше притока в отсутствие трещины [1, 2]. При этом коэффициент продуктивности такой скважины  $\delta = q/\Delta p$  ( $q$  — приток жидкости в единицу времени,  $\Delta p$  — перепад давления между скважиной и невозмущенной жидкостью) равен продуктивности «фиктивной» скважины с радиусом, равным  $1/4$  длины трещины. Если взаимодействуют две скважины — нагнетательная и эксплуатационная, и отношение длины трещины, созданной на одной из скважин, к расстоянию между ними больше некоторого критического значения, то продуктивность зависит также и от ориентации трещины [3]. Эффективность работы скважин зависит также и от реальной гидравлической проводимости трещины [4—6].

Поскольку при извлечении нефти часто применяются различные системы расстановки нагнетательных и эксплуатационных скважин [7], обладающие трансляционной симметрией, представляет интерес проанализировать влияние создания на тех или иных скважинах трещин гидроразрыва и выяснить условия, при которых может быть достигнуто наиболее эффективное использование таких скважин.

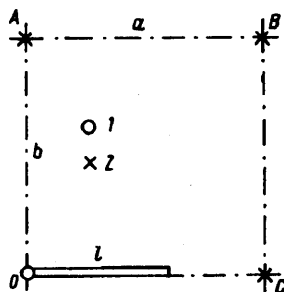
1. Среди различных способов симметричной расстановки системы нагнетательных и добывающих скважин некоторые схемы (параллельная, пяти- и девятиточечная [7]) имеют в качестве простейшего повторяющегося элемента прямоугольник. Внутри этого элемента течение происходит независимо от других элементов, а на его границах выполняются условия непротекания.

Рассмотрим фильтрацию жидкости внутри такого элемента, предполагая, что некоторые скважины пересекаются вертикальными трещинами одинаковой ориентации и гидравлической проводимости.

Пусть пласт, в котором происходит течение жидкости, имеет постоянную толщину  $2H$ , совпадающую с высотой трещин, и однородные гидравлические характеристики — проницаемость  $k$  и пьезопроводность  $\chi$ . Раскрытие трещины (расстояние между ее плоскостями)  $2w$  считаем постоянным до ее границ во всех направлениях (на фиг. 1 изображена отдельная скважина, пересекаемая трещиной).



Фиг. 1



Фиг. 2

Пусть  $x$  и  $y$  — декартовы координаты,  $P$  — давление жидкости, распределение которого в пласте описывается уравнением Лапласа [8]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 \quad (1.1)$$

На границах элемента будем предполагать выполненными условия отсутствия потока жидкости

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0, \quad r = \Gamma \quad (1.2)$$

где  $\partial/\partial n$  — нормальная производная к границе  $\Gamma$ .

Стационарное движение жидкости по трещине длины  $l$  подчиняется уравнению непрерывности и закону Дарси [6], его характеристики считаются зависящими только от одной пространственной переменной  $\varphi$ , отсчитываемой от середины трещины (см. фиг. 1)

$$4wH \frac{du}{d\varphi} = f^+ + f^- \quad (1.3)$$

$$u(\varphi) = -\frac{k_c}{\mu} \frac{d\Phi}{d\varphi}, \quad f^\pm = -2H \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n^\pm} \quad (1.4)$$

Здесь  $u$  — скорость движения жидкости,  $\Phi$  — давление в трещине,  $k_c$  — проницаемость трещины, которая считается постоянной,  $\mu$  — вязкость жидкости,  $f^\pm$  — потоки жидкости из пласта в трещину через ее поверхности в двух противоположных направлениях в расчете на единицу длины,  $n$  — координата, отсчитываемая по нормали от поверхности трещины.

На границе пласта и трещины непрерывно давление  $P$ , а в точках расположения скважин с интенсивностью  $Q$  непрерывен поток жидкости

$$P = \Phi \quad (1.5)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{k}{\mu} r \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{Q}{2\pi} \quad (1.6)$$

где  $r$  — расстояние до центра скважины.

Введем безразмерные переменные по формулам

$$P = \frac{Q\mu}{k} P', \quad x = Lx', \quad y = Ly', \quad \varphi = L\varphi', \quad l = Ll', \quad C = \frac{wk_c}{lk}$$

где  $L$  — характерная длина, способ задания которой описан ниже.

Тогда уравнения (1.3)—(1.4), (1.6) примут вид (штрихи над безразмерными переменными опущены, в силу условия (1.5) давление в трещине и пласте обозначается одной буквой  $P$ )

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \theta \frac{\partial P}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial P}{\partial n^+} + \frac{\partial P}{\partial n^-} = 0, \quad \theta = 2Cl \quad (1.7)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{1}{2\pi}$$

а уравнения (1.1), (1.2), (1.5) останутся без изменений. Здесь  $C$  — гидравлический параметр трещины.

2. Рассмотрим следующие способы расстановки скважин: параллельная, пяти- и девятиточечная схемы [7]. На фиг. 2 приведен правый нижний квадрат девятиточечной схемы (вид сверху), где  $l$  обозначена добывающая скважина, а 2 — нагнетательные. В случае параллельной схемы нагнетательная скважина располагается только в точке  $A$ , а в случае пятиточечной — только в  $C$ .

Течение в таком элементе определяется его геометрическими свойствами — соотношением сторон  $a$  и  $b$ , длиной  $l$  трещины и ее гидравлическими характеристиками. Кроме этого, трещина может пересекать как эксплуатационные, так и нагнетательные скважины, что также влияет на характер течения. В данной работе получены решения задач при различных значениях указанных параметров, но при фиксированной ориентации трещин — так, как они представлены на фиг. 2, т. е. перпендикулярно линии, соединяющей скважины в одном ряду.

Выбор параметра обезразмеривания проводился следующим образом. Пусть в данной схеме разработки на каждую скважину, добывающую или нагнетательную, приходится площадь  $S$ . Положим  $L = \sqrt{S}$ . Тогда полудлина  $a$  и полуширина  $b$  элемента симметрии (фиг. 2) оказываются связанными:  $b = 1/2a$  для параллельной и пятиточечной схем,  $b = 1/a$  для девятиточечной схемы. Приток к эксплуатационным скважинам считается одинаковым и равным единице.

Будем искать решение (1.1), (1.2), (1.5) и (1.7) для случая трещины с бесконечной проводимостью ( $C \rightarrow \infty$ ). При этом давление в трещине постоянно и совпадает с давлением в скважине. Воспользуемся методом конформных отображений, при котором элемент симметрии переводится в верхнюю полуплоскость вспомогательной комплексной переменной  $\zeta$ , а затем — на плоскость комплексного потенциала скорости  $W = -P + i\Psi$  [8].

Не приводя промежуточных выкладок, запишем связь между указанными величинами для случая параллельной схемы в квадратурах

$$Z = x + iy = \frac{a\sqrt{1+\gamma}}{2F(\pi/2, \alpha)} \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{\zeta(\zeta+1)(\zeta-\gamma)}} \quad (2.1)$$

$$W = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{\chi-1}{\chi+1}, \quad \chi = \sqrt{\frac{\gamma+B}{\gamma+1} + \frac{\gamma(1-B)}{(\gamma+1)\zeta}}, \quad \cos \alpha = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \quad (2.2)$$

где  $F(\zeta, \alpha)$  — неполный эллиптический интеграл 1-го рода [9], параметры  $\gamma$  и  $B$  определяются из уравнений

$$2a^2 F(\pi/2, \pi/2 - \alpha) = F(\pi/2, \alpha)$$

$$F\left(\arcsin \sqrt{\frac{B(\gamma+1)}{\gamma+B}}, \alpha\right) = \frac{l}{a} F\left(\frac{\pi}{2}, \alpha\right)$$

Если радиус нагнетательной скважины  $r \ll a$ , то из приведенных формул легко найти давление на ней  $P_c$ .

$$P_c = -\frac{1}{2\pi} \ln \frac{rF(\pi/2, \alpha) \sqrt{1-\beta}}{2\sqrt{1+\gamma}\alpha} \quad (2.3)$$

В тех случаях, когда трещины создаются только на нагнетательных скважинах, приведенные решения остаются справедливыми, если изменить в (2.2) и (2.3) знак перед формулами.

Рассмотрим случай, когда трещины пересекают как нагнетательные, так и эксплуатационные скважины и имеют одинаковые длины. Здесь имеют место соотношения (2.1) и

$$W = \frac{i\sqrt{1+\gamma}}{8F(\pi/2, \alpha')} \int_0^{\chi} \frac{d\chi}{\sqrt{\chi(\chi+1)(\chi-\gamma')}} \quad (2.4)$$

$$\zeta = \frac{B\varepsilon}{B+\varepsilon+B\chi}, \varepsilon = \frac{B+\gamma}{1-B}, \gamma' = \frac{\gamma(B+\varepsilon)}{B(\varepsilon-\gamma)}, \alpha' = \arccos \sqrt{\frac{\gamma'}{1+\gamma'}}$$

Перепад давления между нагнетательными и добывающими скважинами равен

$$P_c = \frac{F(\pi/2, \pi/2 - \alpha')}{4F(\pi/2, \alpha')}$$

Для пятиточечной схемы справедливы выражения (2.1), (2.2), где  $\chi = \sqrt{1+B/\zeta}$ , а давление на скважине имеет вид

$$P_c = -\frac{1}{2\pi} \ln \frac{rF(\pi/2, \alpha) \sqrt{B}}{2\sqrt{1+\gamma}a} \quad (2.5)$$

Для пятиточечной схемы имеет место та же ситуация, что и для параллельной: если трещины проходят только через нагнетательные скважины, формула (2.1) не изменится, а в (2.2) и (2.5) следует изменить знак перед правой частью. Поэтому здесь приведено решение только для того случая, когда трещины пересекают все скважины, одинаково ориентированы и имеют одинаковые длины. Эти решения совпадают с (2.3), (2.4), если в них положить  $\chi = \zeta/B$ ,  $\gamma' = \gamma/B^2$ .

Рассмотрим девятиточечную схему (фиг. 2). Потенциал  $W$  и уравнение для  $\gamma$  здесь имеют вид

$$W = \frac{1}{12\pi} \ln \frac{(\chi - \sqrt{1-B})(\chi-1)(\gamma\chi - \sqrt{\gamma+B})}{(\chi + \sqrt{1-B})(\chi+1)(\gamma\chi + \sqrt{\gamma+B})}$$

$$\alpha^2 F(\pi/2, \pi/2 - \alpha) = F(\pi/2, \alpha), \chi = \sqrt{\frac{B}{\zeta} + 1}$$

Давления на нагнетательных скважинах  $A, B, C$  одинакового радиуса  $r$  определяются из формул

$$P_n = -\frac{1}{6\pi} \ln \frac{rF(\pi/2, \alpha)}{2a\sqrt{1+\gamma}} \sqrt{D_n}, n = A, B, C$$

$$D_A = \frac{B(1+\gamma)}{(B+\gamma)} L_1 L_3, D_B = B L_2 L_3, D_C = \frac{B(1+\gamma)}{(1-B)} L_1 L_2$$

$$L_1 = \frac{\sqrt{B+\gamma} - \sqrt{\gamma(1-B)}}{\sqrt{B+\gamma} + \sqrt{\gamma(1-B)}}, L_2 = \frac{1 - \sqrt{1-B}}{1 + \sqrt{1-B}}, L_3 = \frac{\sqrt{B+\gamma} - \sqrt{\gamma}}{\sqrt{B+\gamma} + \sqrt{\gamma}}$$

Если трещины одинаковой длины и ориентации созданы только на нагнетательных скважинах, то потенциал  $W$  выражается в квадратурах

$$W = \frac{i}{12J_1} \int_0^{\zeta} \frac{(\zeta - \delta_1)(\zeta + \delta_2) d\zeta}{\zeta \sqrt{(\zeta - \varepsilon)(\zeta - \beta)(\zeta - \gamma)(\zeta + B')(\zeta + 1)}}$$

$$\beta = \frac{\gamma}{B}, B' = \frac{\gamma(1-B)}{B+\gamma}$$

Параметры  $\delta_1$  и  $\delta_2$  определяются из уравнений

$$J_1 = J_2, J_1 = J_3 \quad (2.6)$$

$$J_1 = \int_{B'}^1 U(x) dx, J_2 = \int_{\beta}^{+\infty} U(-x) dx, J_3 = \int_{\gamma}^{\alpha} U(-x) dx \quad (2.7)$$

$$U(x) = \frac{1(\delta_1 + x)(\delta_2 - x)}{|x| \sqrt{1(\beta + x)(\varepsilon + x)(\gamma + x)(x - B')(1 - x)}}$$

Если на добывающей скважине радиуса  $r$  поддерживается давление  $P = 0$ , то на нагнетательных давления имеют вид

$$P_A = \frac{J_4}{12J_1}, P_B = \frac{J_5 + J_6}{12J_1}, P_C = \frac{J_5}{12J_1} \quad (2.8)$$

$$J_4 = \int_0^{\gamma} U(-x) dx, J_5 = \int_{\zeta_0}^{B'} U(x) dx, J_6 = \int_1^{+\infty} U(x) dx \quad (2.9)$$

$$\zeta_0 = \gamma \left( \frac{rF(\pi/2, \alpha)}{a\sqrt{1+\gamma}} \right)^2$$

Наконец, в случае, когда трещины проходят через все скважины, решение имеет вид (2.6)–(2.9) и

$$W = \frac{i}{12J_1} \int_0^{\zeta} \frac{(\zeta - \delta_1)(\zeta + \delta_2) d\zeta}{\sqrt{\zeta} \sqrt{(\zeta - \varepsilon)(\zeta - \beta)(\zeta - \gamma)(\zeta + B')(\zeta + 1)(\zeta + B)}}$$

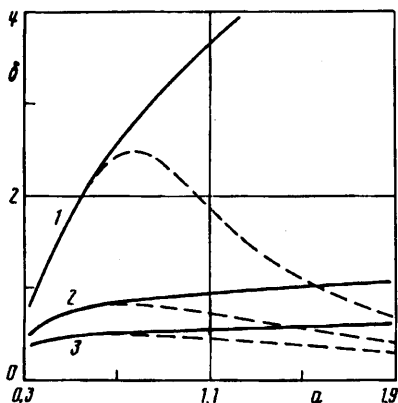
$$U(x) = \frac{1(\delta_1 + x)(\delta_2 - x)}{\sqrt{|x(\beta + x)(\varepsilon + x)(\gamma + x)(x - B')(x - B)(1 - x)|}}$$

$$J_4 = \int_0^{\gamma} U(-x) dx, J_5 = \int_0^{B'} U(x) dx$$

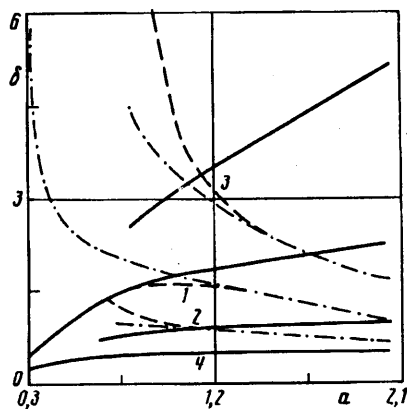
3. Эффективность работы системы скважин зависит от расстояния между ними. Здесь рассмотрено влияние параметра  $a$  на эффективную продуктивность эксплуатационной скважины  $\delta$ , определяемой как  $\delta = 1/\Delta P$ , где  $\Delta P$  — перепад давления между нагнетательной и эксплуатационной скважинами. В случае девятиточечной схемы перепад  $\Delta P$  может быть определен тремя способами (по числу нагнетательных скважин, каждая из которых создает одинаковый поток). В соответствии с этим будем рассматривать три величины  $\delta_n$ .

Зависимости  $\delta$  от  $a$  для параллельных и пятиточечных схем (соответственно сплошные и штриховые линии) приведены на фиг. 3 при  $l = 0,3$  и  $r = 0,001$ . Кривые 1 иллюстрируют случай, когда трещины созданы на всех скважинах, 2 — только на эксплуатационных скважинах, 3 — трещины отсутствуют. Из фигуры видно, что пятиточечные схемы дают максимум продуктивности при  $a \approx 0,7$ , что соответствует квадратной сетке. Даже при малых  $a$  продуктивность системы скважин увеличивается почти вдвое, если все скважины пересекаются трещинами гидроразрыва, и это соотношение сохраняется на всем диапазоне  $a$  для пятиточечной схемы при данной длине трещины.

Для параллельных схем различие в значениях продуктивности монотонно



Фиг. 3



Фиг. 4

возрастает с увеличением  $a$ . Этот эффект объясняется тем, что в параллельной расстановке увеличение  $a$  приводит к уменьшению расстояния между трещинами, в силу чего обеспечивается близкий к одномерному поток жидкости из одной скважины в другую, тогда как для пятиточечной расстановки приближение трещин по одной координате компенсируется увеличением по другой при постоянной площади элемента и поток остается неоднородным.

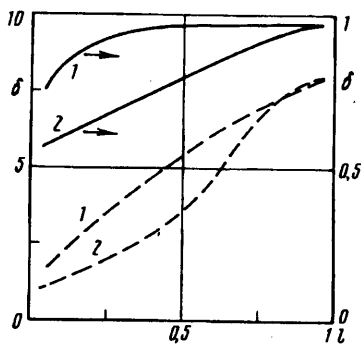
Анализ влияния ориентации трещины на интерференцию двух скважин показал [3], что при  $\alpha > 45^\circ$  ( $\alpha$  — угол между линией, соединяющей скважины, и плоскостью трещины) ориентация практически несущественна при фиксированном расстоянии между скважинами. В нашем случае это соответствует пятиточечной схеме с  $a < 1/\sqrt{2}$ . Однако, в силу выбранного способа обезразмеривания длины, расстояние между скважинами при изменении  $\alpha$  также изменяется, поэтому чистое влияние ориентации трещины здесь не анализировалось.

Это же объяснение может быть дано различию в зависимостях для  $\delta$  при пятиточечной и параллельной расстановках, которое имеется при больших  $a$ . Если при увеличении  $a$  скважины в параллельной расстановке сближаются, то в пятиточечной расстояние меняется менее заметно, в результате чего продуктивность начинает уменьшаться.

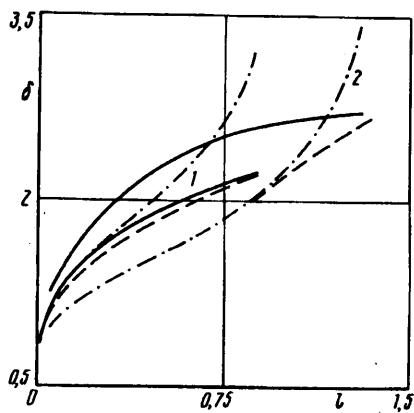
Для девятиточечной схемы зависимость  $\delta$  от  $a$  для  $l=0,3$  приведена на фиг. 4 (сплошными линиями —  $\delta_A$ , штриховыми —  $\delta_B$ , штрихпунктирными —  $\delta_C$ , кривые 1 соответствуют случаю, когда трещины созданы только на эксплуатационной скважине, 2 — на нагнетательных скважинах, 3 — на всех скважинах, 4 — трещины отсутствуют). Диапазон изменения  $a$  для первой схемы — от 0,3 до 2, а для второй и третьей схем — от 0,6 до 2, так как при  $a=0,6$  происходит смыкание трещин от соседних скважин.

Из графика видно, что для девятиточечной схемы имеют место качественно те же зависимости, которые установлены для параллельной и пятиточечной схем. Эффективность работы нагнетательных скважин, характеризуемая параметром  $\delta_n$  (чем больше  $\delta_n$ , тем меньшее давление необходимо создать на скважине для поддержания заданного расхода), для девятиточечной системы расстановки скважин максимальна, когда трещины созданы на всех скважинах (кривые 3). Эффективность снижается, когда трещины расположены только на эксплуатационных скважинах; еще меньше она оказывается, если трещины созданы на нагнетательных скважинах (кривые 1 и 2 соответственно). Наименьшая эффективность скважин — в отсутствие трещин (кривая 4).

Таким образом, уменьшение расстояния между рядами скважин (увеличение  $a$ ) дает различный эффект при различных способах расстановки скважин. Для параллельной расстановки это уменьшение дает рост продуктивности, тогда как для пятиточечной имеется оптимальное значение  $a$ . Наличие трещин одновременно



Фиг. 5



Фиг. 6

на нагнетательных и добывающих скважинах дает существенное увеличение продуктивности по сравнению со случаем, когда трещины созданы только на одном типе скважин.

Сравнение результатов для различных схем показывает, что выбор наиболее эффективной из них зависит от расположения трещин гидроразрыва и от параметра  $a$ , определяющего форму элемента симметрии.

4. Результаты расчетов коэффициентов продуктивности скважин в зависимости от  $l$  приведены на фиг. 5 при  $a=1$  для параллельных и пятиточечных схем (кривые 1 и 2, сплошные линии — трещины на эксплуатационных скважинах, штриховые линии — на всех скважинах).

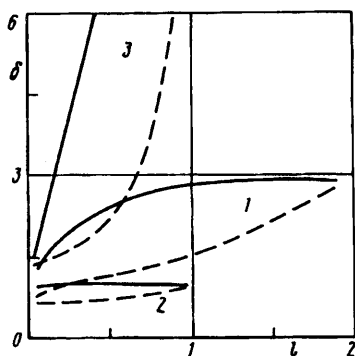
Для параллельной схемы с одной трещиной гидроразрыва имеется оптимальное значение длины трещины (в приведенном примере  $l \approx 0,4$ ): при больших  $l$  продуктивность почти постоянна. В остальных случаях  $\delta$  возрастает с  $l$ , незначительно отклоняясь от линейной зависимости.

Если трещины гидроразрыва имеются на всех скважинах, то влияние  $l$  на  $\delta$  оказывается значительнее по сравнению со схемами, в которых трещины созданы на одной из скважин. С увеличением  $l$  различия между различными схемами уменьшаются, причем в схемах с двумя трещинами значение  $\delta \rightarrow \delta^* = 8$  при  $l \rightarrow a = 1$ , где  $\delta^*$  — максимально возможное значение, соответствующее одномерному течению между двумя трещинами (штриховые линии). Из приведенных результатов следует, что продуктивность существенно выше, если трещины созданы на каждой из скважин.

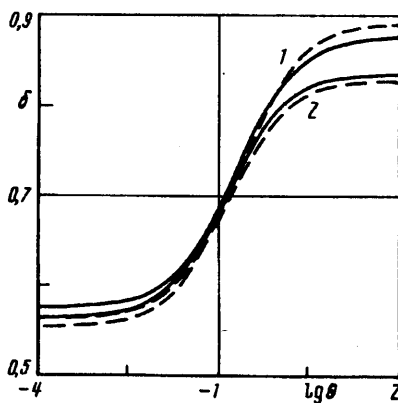
На фиг. 6 приведены зависимости  $\delta$  от  $l$  для случая девятиточечной схемы при  $a=1$  и 1,4 (кривые 1 и 2). Сплошные линии —  $\delta_A$ , штриховые —  $\delta_B$ , штрихпунктирные —  $\delta_C$ . Здесь также имеет место монотонная зависимость коэффициентов продуктивности от  $l$ . При этом с увеличением  $a$  уменьшается расстояние между скважиной А и эксплуатационной скважиной, что приводит к увеличению  $\delta_A$  (сплошные линии). Значения  $\delta_B$  и  $\delta_C$ , наоборот, уменьшаются.

Сравним продуктивности при различных способах расположения трещин. Зависимости  $\delta$  от  $l$  приведены на фиг. 7 при  $a=2$ . Здесь сплошными линиями представлены зависимости коэффициента продуктивности  $\delta_A$ , штриховыми —  $\delta_C$ . Зависимости  $\delta_B$  и  $\delta_C$  практически совпадают (кроме участка  $l \sim a$ ). Для схемы, в которой трещины созданы на всех скважинах, рост  $\delta$  оказывается более значительным, чем в остальных (кривые 3). Из полученных результатов видно, что при разных  $l$  эффективность схемы, где трещины расположены только на нагнетательных скважинах, самая низкая.

Таким образом, влияние длин трещин на продуктивность эксплуатационных скважин зависит от относительного расположения скважин, а также от того, где



Фиг. 7



Фиг. 8

созданы трещины гидроразрыва. В тех случаях, когда трещины созданы на всех скважинах, влияние значительно: продуктивность может возрасти в несколько раз, причем прирост будет существенно зависеть от положения скважины относительно трещины.

В работе [3] утверждается, что если расстояние между нагнетательной и эксплуатационной скважинами  $r_w > 4l$  (в принятых здесь обозначениях), то влияние трещины на динамику изменения давления на скважине в нестационарных условиях становится пренебрежимо малым. Из результатов, приведенных на фиг. 5, следует, что в условиях течения в элементе разработки пласта даже при  $r_w > 10l$  различие в продуктивностях достигает 100% как в параллельной, так и в пятиточечной схемах.

5. Если в уравнении (1.7) параметр  $\theta$  отличен от нуля, то получить аналитическое решение задачи не удастся, поэтому она решалась численно. В данной работе применен метод конечных элементов в галеркинской форме. При этом выбраны четырехугольные базисные элементы, а базисные функции — в виде полиномов второй степени.

Были проведены расчеты для пятиточечной схемы и параллельной схемы с трещинами гидроразрыва, проходящими через эксплуатационные скважины. На фиг. 8 приведены значения  $\delta$  при  $l = 0,3$  и  $0,6$  (кривые 1 и 2) в зависимости от  $\theta$  для параллельной расстановки (сплошные линии) и для пятиточечной схемы (штриховые линии) при  $a = \sqrt{2}$ . Из полученных результатов видно, что изменение  $\theta$  в диапазоне от 0,01 до 100 приводит к увеличению коэффициента продуктивности скважин в среднем на 40—50%. Видно, что при  $\theta \geq 100$  продуктивность скважины  $\delta$  перестает зависеть от  $\theta$ , что соответствует трещине с бесконечной проводимостью и согласуется с результатами [10] ( $C \geq 150$  в используемых здесь единицах).

Гидравлические характеристики трещины могут описываться одним из двух безразмерных параметров  $C$  и  $\theta$ . Как показали расчеты зависимости  $\delta$ , величина  $\theta$  более удобна для описания влияния гидропроводности трещины на эффективность работы системы скважин, тогда как для одиночной скважины предпочтительнее использовать  $C$  [10]. Как видно из фиг. 8, при малых  $\theta$  значения  $\delta$  для одной и той же схемы разработки совпадают при разных  $l$ . Если выбрать  $C$  в качестве гидравлической характеристики трещины, такого совпадения значений  $\delta$  при малых  $C$  нет. Это объясняется тем, что при малых  $l$  характерным параметром длины в задаче является расстояние между скважинами, связанное с  $L$  и учтенное в  $\theta$ .

Автор благодарит В. М. Ентова за плодотворное обсуждение результатов работы.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Prats M.* Effect of vertical fractures on reservoir behavior. Incompressible fluid case // SPEJ. 1961. J. V. 1. № 2. P. 105—117.
2. *Кадет В. В., Селяков В. И.* Фильтрация флюида в среде, содержащей эллиптическую трещину гидроразрыва // Изв. вузов. Нефть и газ. 1988. № 5. С. 54—60.
3. *Mousli N. A., Raghavan R., Cinco-Ley H., Samaniego V. F.* The influence of vertical fractures intercepting active and observation wells on interference tests // SPEJ. 1982. V. 22. № 6. P. 933—944.
4. *McGuire W. J., Sikora V. J.* The effect of vertical fractures on well productivity // Trans. AIME. 1960. V. 219. № 12. P. 401—403.
5. *Soliman M.* Design and analysis of a fracture with changing conductivity // J. Canad. Petrol. Technology. 1986. V. 25. № 5. P. 62—67.
6. *Зазовский А. Ф., Тодуа Г. Т.* О стационарном притоке жидкости к скважине с вертикальной трещиной гидроразрыва большой протяженности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 4. С. 107—116.
7. *Фазлыев Р. Т.* Площадное заводнение нефтяных месторождений. М.: Недра, 1979. 255 с.
8. *Полубаринова-Кочина П. Я.* Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
9. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. М.: Наука, 1979. 830 с.
10. *Cinco-Ley H., Samaniego V. F., Domínguez N.* Transient pressure behaviour for a well with a finite-conductivity vertical fracture // SPEJ. 1978. V. 18. № 4. P. 253—264.

Москва

Поступила в редакцию  
2. II. 1993