

## ***Глава 7***

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ТРЕЩИН НА ДИНАМИКУ ОБВОДНЕНИЯ СКВАЖИН ПОСЛЕ ГИДРОРАЗРЫВА**

В настоящее время в России на месторождениях с заводнением добывается более 90 % всей нефти [65]. В низкопроницаемых коллекторах приконтурное и внутриконтурное заводнение нередко сочетается с широкомасштабным применением гидравлического разрыва пласта, являющегося одним из наиболее эффективных методов повышения производительности скважин. Наибольший эффект достигается при проектировании ГРП как элемента системы разработки, когда выбор скважин для проведения гидроразрыва осуществляется с учетом всей пластовой системы, взаимного расположения скважин, взаимовлияния добывающих и нагнетательных скважин [21, 29, 44, 72, 77]. Опыт применения ГРП показывает, что в некоторых случаях сразу после проведения операции наблюдаются как резкий рост, так и падение обводненности [11, 22, 69]. Рост обводненности, как правило, связывают с ускоренным прорывом воды по трещине от нагнетательных скважин или с разрывом экрана, отделяющего продуктивный пласт от водонасыщенного пласта. Снижение обводненности обычно объясняют вовлечением в разработку зон и пропластков, не дренированных ранее, сообщаемость которых со скважиной обеспечивается вертикальной трещиной гидроразрыва.

Оценка эффективности и влияния ГРП на динамику обводнения скважин связана с анализом сложных фильтрационных процессов многофазной фильтрации в окрестности скважины и трещины [46, 51, 72]. Перераспределение потоков в латеральном направлении из-за появления в пласте высокопроводящей трещины обу-

словливает изменение обводненности продукции скважины за счет ускоренного продвижения флюидов по трещине. В зависимости от положения трещины относительно текущей границы раздела нефти и воды обводненность добываемой продукции после ГРП может резко возрасти или снизиться. В общем случае требуются расчеты на базе специальных численных гидродинамических моделей. Однако качественные оценки могут быть выполнены на основе достаточно наглядной аналитической модели.

### **7.1. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОДВИЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА ДВУХ ЖИДКОСТЕЙ К СКВАЖИНЕ, ПЕРЕСЕЧЕННОЙ ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА**

Анализируется поведение языка обводнения в окрестности добывающей скважины после проведения гидроразрыва, появления в пласте высокопроводящей трещины и установления стационарного распределения давления. Предполагается, что вытеснение носит поршневой характер, суммарная подвижность смеси в области, занятой водой, и в области чистой нефти постоянна, средняя доля воды в зоне смеси –  $F$ . Начальное положение границы раздела нефти и прорвавшейся в скважину воды непосредственно перед проведением ГРП известно,  $\Gamma_0 : y = y_0(x)$ . Движение границы раздела  $\Gamma : y = y(x,t)$  описывается уравнением в частных производных [23, 24]

$$\phi h y_t - \phi_x y_x + \phi_y = 0. \quad (7.1)$$

Здесь  $x, y$  – координаты,  $t$  – время,  $\phi$  – потенциал течения,  $\phi$  – пористость,  $h$  – толщина пласта. Уравнение (7.1) относится к гиперболическому типу и может быть решено методом характеристик [62], которые в данном случае являются линиями тока рассматриваемого течения:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{\phi_x}{\phi h}; \quad \frac{dy}{dt} = -\frac{\phi_y}{\phi h}.$$

Уравнения характеристик в комплексной форме имеют вид

$$\frac{d\bar{Z}}{dt} = -\frac{\Phi_z}{\phi h}; \quad \psi(z) = \text{const} \quad (7.2)$$

где  $Z = x + iy$  – комплексная переменная;  $\psi$  – функция тока;  $\Phi = \varphi + i\psi$  – комплексный потенциал течения. В случае идеальной трещины, расположенной вдоль оси  $x$  с центром в начале координат, имеющей полудлину  $l$ , распределение потенциала имеет вид

$$\Phi = \frac{Q}{2\pi} \ln \left( \frac{Z}{l} + \sqrt{\frac{Z^2}{l^2} - 1} \right) + \varphi_w. \quad (7.3)$$

Здесь  $\varphi_w$  – значение потенциала на контуре трещины, определяемое забойным давлением,  $Q$  – дебит жидкости после ГРП. Для интегрирования уравнения (7.2) с учетом (7.3) перейдем к новой переменной  $\varphi$ , определяемой вдоль линии тока:

$$Z = l \operatorname{ch} \left( \frac{2\pi(\varphi - \varphi_w + i\psi)}{Q} \right). \quad (7.4)$$

Тогда начальное условие для уравнения (7.2) будет задаваться значениями потенциала (7.3) на границе раздела нефти и воды  $\varphi_0 = \varphi(x, y_0(x))$ . В результате интегрирования получим

$$\operatorname{sh} \left( \frac{4\pi(\varphi - \varphi_w)}{Q} \right) - \operatorname{sh} \left( \frac{4\pi(\varphi_0 - \varphi_w)}{Q} \right) - \frac{4\pi(\varphi - \varphi_0)}{Q} \cos \frac{4\pi\psi}{Q} = -\frac{2Qt}{\pi\phi h l^2}.$$

Моменты  $t^*$  подхода различных точек границы раздела нефти и воды к трещине вдоль соответствующих линий тока определяются из этого уравнения при  $\varphi = \varphi_w$ :

$$\operatorname{sh} \left( \frac{4\pi(\varphi_0 - \varphi_w)}{Q} \right) - \frac{4\pi(\varphi_0 - \varphi_w)}{Q} \cos \frac{4\pi\psi}{Q} = \frac{2Qt^*}{\pi\phi h l^2}. \quad (7.5)$$

Зная положение границы раздела относительно трещины в произвольные моменты времени, можно вычислить долю воды в добываемой продукции и динамику обводненности.

Пусть к моменту проведения гидроразрыва язык обводнения сформировался в результате прорыва воды к одиночной скважине с дебитом  $Q_0$  от прямолинейной границы, расположенной на расстоянии  $R_0$  от скважины параллельно оси  $x$ . Предположим, что угол у вершины языка обводнения перед ГРП составляет  $2\alpha_0$ , соответственно обводненность продукции скважины равна  $\alpha_0 F/\pi$  (рис. 7.1). Уравнение границы раздела нефти и воды в момент прорыва может быть получено в результате интегрирования уравнения (7.1) для потенциала точечного стока  $\Phi = \frac{Q_0}{2\pi} \ln Z + C$  с учетом начального положения границы раздела [23]:

$$Z_0 = R_0 \sqrt{\sin^2 \beta - \cos^2 \alpha_0} e^{\beta}, \quad 0 < \beta < \pi. \quad (7.6)$$

В частности, если гидроразрыв производится сразу после подхода фронта воды к скважине и  $\alpha_0 = 0$ , то уравнение (7.6) принимает вид  $Z_0 = \frac{R_0}{\operatorname{tg} \beta} e^{\beta}$ .

Если направление трещины перпендикулярно первоначальной границе раздела нефти и воды, т.е. граница параллельна оси  $y$ , то к моменту достижения обводненности  $\alpha_0$  положение границы раздела задается уравнением

$$Z_0 = R_0 \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \alpha_0} e^{\beta}, \quad -\frac{\pi}{2} < \beta < \frac{\pi}{2}. \quad (7.7)$$

При  $\alpha_0 = 0$  имеем  $Z_0 = R_0 \operatorname{tg} \beta e^{\beta}$ .

Основным фактором, определяющим обводненность непосредственно после ГРП, является направление трещины.

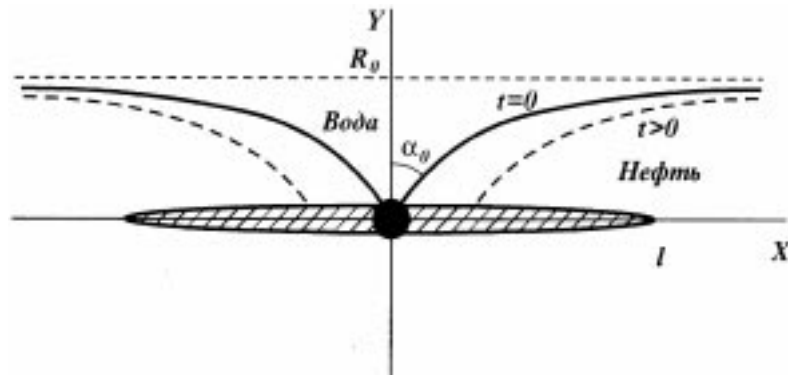


Рис. 7.1. Положение границы раздела в различные моменты времени (трещина ГРП параллельна первоначальной границе)

Так, если трещина проходит вне языка обводнения, то обводненность сразу после ГРП резко падает, поскольку в трещину начинает поступать нефть из зоны, ранее не охваченной вытеснением, потом по мере заводнения пласта доля воды в добываемой продукции постепенно возрастает. И наоборот, если одно из крыльев трещины оказывается внутри языка обводнения, то доля воды в добываемой продукции после ГРП сразу возрастает от  $\alpha_0 F/\pi$  до  $F/2$ , затем некоторое время снижается по мере того, как вода, находящаяся вблизи скважины, поступает в трещину и замещается нефтью, после чего наблюдается постепенный рост обводненности, связанный с продвижением фронта воды вдоль трещины к скважине.

Для количественных оценок необходимо подставить соответствующее начальное условие (7.6) или (7.7) в уравнение (7.5) с учетом соотношения (7.4).

Наибольший интерес представляют две крайние ситуации, когда ось трещины параллельна первоначальной границе раздела нефти и воды либо ортогональна этой границе.

1. Если ось трещины параллельна первоначальной границе раздела, то уравнение границы к моменту проведения ГРП задается выражением (7.6). Связь между значениями потенциала  $\phi_0$  и функции тока  $\psi$  вдоль этой границы определяется в результате подстановки (7.6) в (7.4):

$$\frac{4\pi(\varphi_0 - \varphi_w)}{Q} = \ln \left[ A + \sqrt{A^2 - 1} \right]; \quad (7.8)$$

$$\operatorname{sh} \left( \frac{4\pi(\varphi_0 - \varphi_w)}{Q} \right) = \sqrt{A^2 - 1}; \quad \operatorname{ch} \left( \frac{4\pi(\varphi_0 - \varphi_w)}{Q} \right) = A;$$

$$A = B + \sqrt{B^2 - C}; \quad B = \frac{R_0^2}{I^2} \left( \operatorname{tg}^{-2} \frac{2\pi\Psi}{Q} - \operatorname{tg}^2 \alpha_0 \right) + \operatorname{sh}^2 \frac{2\pi\Psi}{Q}; \quad (7.9)$$

$$C = 2 \operatorname{sh}^2 \frac{2\pi\Psi}{Q} - 2 \frac{R_0^2}{I^2} \left( \operatorname{tg}^{-2} \frac{2\pi\Psi}{Q} + \operatorname{tg}^2 \alpha_0 \right) - 1.$$

Момент  $t^*$  подхода соответствующих точек границы раздела нефти и воды к трещине вычисляется по формуле (7.5) с учетом (7.8), (7.9); обводненность добываемой продукции  $\omega$  при этом составит

$$\omega = F \left( \frac{1}{2} - \frac{2\Psi}{Q} \right). \quad (7.10)$$

Поскольку сразу после проведения гидроразрыва трещина оказывается в зоне чистой нефти, то обводненность резко снижается. Последующий рост обводненности в зависимости от количества добытой нефти оказывается несколько более медленным, чем в случае, если бы ГРП не проводился. Поэтому рассмотренная ситуация наиболее благоприятная и может привести к заметным результатам даже при достаточно высокой доле воды в продукции скважины перед гидроразрывом. Увеличение длины трещины приводит к дополнительному приросту добычи нефти.

2. Если ось трещины перпендикулярна первоначальной границе раздела, то положение границы к моменту проведения ГРП задается уравнением (7.7). В результате ГРП одно из крыльев трещины оказывается в зоне, заполненной водой. В этом случае схема решения остается прежней, однако значения  $A$ ,  $B$  и  $C$ , подставляемые в (7.8), определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
A &= B \mp \sqrt{B^2 - C}; \quad B = \frac{R_0^2}{l^2} \left( \operatorname{tg}^2 \frac{2\pi\psi}{Q} - \operatorname{tg}^2 \alpha_0 \right) - \cos^2 \frac{2\pi\psi}{Q}; \\
C &= 2 \cos^2 \frac{2\pi\psi}{Q} + 2 \frac{R_0^2}{l^2} \left( \operatorname{tg}^2 \frac{2\pi\psi}{Q} + \operatorname{tg}^2 \alpha_0 \right) - 1.
\end{aligned} \tag{7.11}$$

Обводненность добываемой продукции в момент  $t^*$  в этом случае составит

$$\omega = 2\psi F/Q. \tag{7.12}$$

Поскольку сразу после ГРП одно из крыльев трещины оказывается в области, занятой водой, обводненность возрастает до  $F/2$ . После этого в результате перераспределения фильтрационных потоков, связанного с появлением трещины, вода, находящаяся вблизи скважины, поступает в трещину и замещается нефтью, и доля воды в потоке несколько снижается. В момент времени  $t_{\min}$ , определяемый из условия  $B^2 = C$ , достигается минимальное значение обводненности; соответствующая линия тока  $\psi_{\min}$  показана на рис. 7.2 (график 3). Затем граница раздела нефти и воды смещается вдоль трещины к скважине, и доля воды в добываемой продукции возрастает. Увеличение длины трещины может привести к увеличению притока воды к краевым участкам трещины и снижению абсолютного отбора нефти.

Полученные результаты могут быть распространены на случай ряда добывающих скважин, параллельного первоначальной границе раздела нефти и воды. Если полудлина трещины  $l$  существенно меньше расстояния между скважинами в ряду  $\sigma$ , то картина течения в окрестности каждой скважины определяется решением, полученным выше для одиночной скважины. Зависимости (7.5), (7.8)–(7.12) позволяют определить динамику обводнения после гидроразрыва. Однако дебиты одиночной скважины  $Q$  и скважины в ряду  $Q_r$  при прочих равных условиях различны. Отношение дебита жидкости после ГРП к дебиту до гидроразрыва для одиночной скважины определяется формулой [92]

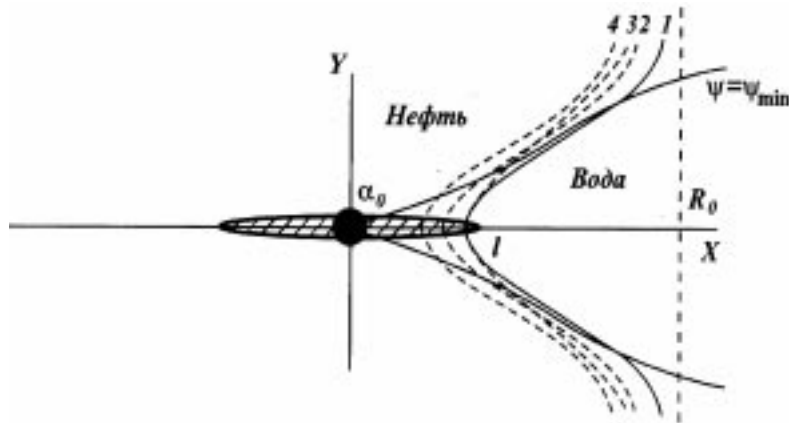


Рис. 7.2. Положение границы раздела в различные моменты времени (трещина ортогональна первоначальной границе):  
 1 -  $t = 0$ ; 2 -  $0 < t < t_{\min}$ ; 3 -  $t = t_{\min}$ ; 4 -  $t > t_{\min}$

$$\frac{Q}{Q_0} = \ln \frac{2R_0}{r_w} / \ln \frac{4R_0}{l}$$

Здесь использовано выражение для эффективного радиуса скважины, пересеченной идеальной трещиной гидроразрыва,  $r_e = l/2$ . В случае ряда скважин аналогичное отношение дебитов имеет вид [92]

$$\frac{Q_r}{Q_{r0}} = \ln \left( \frac{\sigma}{\pi r_w} \operatorname{sh} \frac{2\pi R_0}{\sigma} \right) / \ln \left( \frac{2\sigma}{\pi l} \operatorname{sh} \frac{2\pi R_0}{\sigma} \right)$$

Формулы для расчета обводненности (7.10), (7.12) приведены для скважины, расположенной в краевой области пласта, поскольку учитывают продвижение языка обводнения только с одной стороны. Аналогичный процесс имеет место для первого ряда скважин в рядных системах разработки. Если скважина находится в стягивающем ряду, то языки обводнения подходят к ней с двух сторон, и картина течения симметрична относительно линии расположения ряда, поэтому значение обводненности должно быть удвоено.



## 7.2. РАСЧЕТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБВОДНЕННЫХ СКВАЖИН ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА

Результаты расчетов на основе полученных решений могут быть представлены в виде графиков безразмерного дебита нефти  $Q_{oil}/Q_0$  в зависимости от безразмерного времени  $Q_0 t / 3,14 \phi h R_0^2$ , прошедшего с момента ГРП, построенных для скважин, находящихся в краевой зоне или в стягивающем ряду при различной длине  $l/R_0$  и направлении трещин, разной обводненности перед гидроразрывом и различным расстоянии между скважинами в ряду  $\sigma/R_0$ . Например, на рис. 7.3 приведены графики, соответствующие случаю, когда гидроразрыв проводится непосредственно перед прорывом воды к добывающей скважине. Предполагается, что скважина расположена в стягивающем ряду, причем расстояния между скважинами в ряду и до первоначальной границы раздела нефти и воды совпадают  $\sigma/R_0 = 1$ . Приведем некоторые оценки. Пусть  $R_0 = 500$  м,  $\phi = 0,2$ ,  $h = 5$  м, дебит жидкости перед ГРП составляет  $Q_0 = 5$  м<sup>3</sup>/сут. Если трещина гидроразрыва имеет полудлину 50 м, то  $l/R_0 = 0,1$ . Из графика на рис. 7.3 найдем дебит нефти через год после ГРП: для трещины, параллельной ряду, значение  $Q_{oil}/Q_0$  составит 1,8, соответственно дебит нефти – 9 м<sup>3</sup>/сут; для трещины, ортогональной ряду,  $Q_{oil}/Q_0 = 1,5$ , при этом дебит нефти равен 7,5 м<sup>3</sup>/сут. По графику можно определить также дебит нефти, если ГРП не проводится, в данном случае его величина снижается незначительно и через год составит около 5 м<sup>3</sup>/сут. Таким образом, при заданной длине трещины независимо от ее направления эффект от проведения ГРП оказался положительным: получено увеличение дебита нефти. В случае более длинной трещины определяющим фактором при оценке эффективности ГРП оказывается направление трещины. Например, при полудлине 100 м ( $l/R_0 = 0,2$ ) дебит нефти через год после проведения ГРП при параллельной ориентации трещины составит 10 м<sup>3</sup>/сут, а при наиболее неблагоприятной ориентации трещин перпендикулярно ряду всего 2,5 м<sup>3</sup>/сут, т.е. окажется ниже, чем в случае, когда гидроразрыв не проводится.

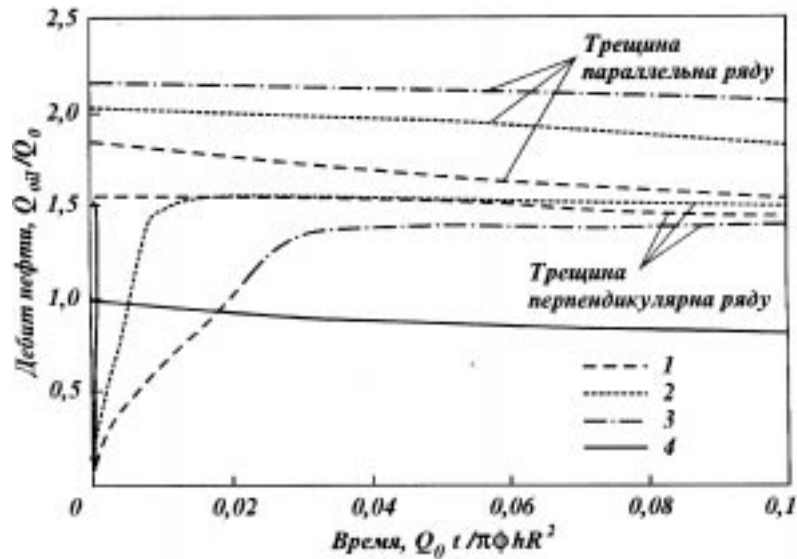


Рис. 7.3. Дебит нефти после прорыва воды в скважину с трещиной гидроразрыва (скважина расположена в стягивающем ряду).  
 $l/R_0$  равно: 1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – без ГРП

Для подтверждения полученных выводов о динамике обводненности после ГРП были проведены численные расчеты на базе специальной трехмерной модели многофазной фильтрации, учитывающей трещины гидроразрыва конечной проводимости. При этом в расчетах использовались реальные фазовые проницаемости и вязкости нефти и воды. Рассматривалось двухстороннее вытеснение нефти водой от прямолинейных параллельных контуров к ряду добывающих скважин, расположенному посередине между ними. Был рассчитан базовый вариант без применения ГРП и варианты с гидроразрывом в добывающих скважинах, который производился в момент достижения заданной обводненности добываемой продукции. Были рассмотрены варианты с обводненностью перед ГРП 1, 25, 50 и 80 %. В отдельных вариантах предполагалась параллельная и ортогональная ориентация трещин по отношению к контуру, т.е. проанализированы как наиболее благоприятная, так и наиболее неблагоприятная ситуация. Расстояние между скважинами в ряду и между рядами было принято равным 600 м, рассчитаны варианты с полудлиной трещин 50, 100 и 200 м.

Несмотря на размазывание фронта воды в сеточных моделях, были выявлены те же эффекты, что и при аналитическом исследовании процесса. Показано, что при параллельной ориентации трещины происходит падение обводненности после ГРП, а затем постепенное возрастание. При ортогональной ориентации трещины обводненность после ГРП резко возрастает, затем несколько снижается, после чего вновь постепенно возрастает.

В вариантах с параллельной ориентацией трещины отмечено снижение обводненности при одновременном росте добычи жидкости вследствие ГРП по сравнению с базовым вариантом. Этот эффект более значителен для длинных трещин. В вариантах с ортогональной ориентацией трещины обводненность выше, чем в базовом варианте, однако поскольку отбор жидкости также выше, то добыча нефти превышает этот показатель базового варианта. Наиболее сильно различия вариантов с разным направлением трещин проявляются в первый год после ГРП, затем уровни текущей добычи нефти сближаются. При благоприятной ориентации трещины отмечена высокая эффективность ГРП на поздней стадии разработки, т.е. при высокой обводненности добываемой продукции. Расчеты показали целесообразность проведения повторных гидроразрывов в такой ситуации. Уменьшение расстояния между скважинами не привело к каким-либо изменениям выявленных закономерностей.

Следует отметить, что аналогичные расчеты, проведенные для пятиточечной системы расстановки скважин, показали, что эффект изменения обводненности в результате перераспределения фильтрационных потоков после ГРП при площадной системе заводнения незначителен. Проведены расчеты технологических показателей как при ориентации трещины по направлению к нагнетательной скважине, так и под углом  $45^\circ$  к этому направлению. Было принято, что расстояние между добывающими и нагнетательными скважинами составляет 400 м, полудлина трещины равна 100 и 200 м. Расчеты показали, что уровни добычи нефти и накопленные показатели вариантов достаточно быстро сближаются. Зависимости текущей обводненности от нефтеотдачи для базового варианта и для вариантов с ГРП с разной ориентацией трещины практически совпадают. Это связано с тем, что для площадных систем разработки коэффициент охвата пласта вытеснением более высокий, чем для рядных систем. Поэтому и эффекты, связанные с

изменением обводненности из-за различной ориентации трещин, в этом случае носят непродолжительный и менее выраженный характер.

Таким образом, влияние направления трещин на обводненность после ГРП оказывается наиболее существенным при рядных системах расстановки скважин и в краевых зонах пласта. В этих случаях направление трещин является важным фактором, определяющим долю воды в продукции обводненных скважин после ГРП. Любые оценки, не учитывающие этот параметр, могут оказаться неверными. Возможно как резкое падение, так и быстрый рост обводненности. Время, в течение которого затем восстанавливается первоначальное значение обводненности, может быть сопоставимо с продолжительностью эффекта ГРП. Учет ориентации трещин при проектировании системы разработки с использованием ГРП дает возможность замедлить процесс обводнения скважины при одновременном увеличении добычи жидкости.