

Глава 8

РАСЧЕТЫ ДЕБИТА СКВАЖИНЫ ПОСЛЕ ГИДРОРАЗРЫВА В НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

8.1. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ПРИТОКЕ ЖИДКОСТИ К СКВАЖИНЕ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В НЕПРОНИЦАЕМОЙ ЛИНЗЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ, ВСКРЫТОЙ ТРЕЩИНОЙ ГИДРОРАЗРЫВА

При размещении скважин на месторождении, как правило, отсутствует детальная картина распределения неоднородности пласта, поэтому отдельные скважины оказываются в низкопроницаемых зонах или даже в непроницаемых линзах. Кроме того, область пониженной проницаемости вокруг скважин может быть обусловлена не только геологическим строением коллектора, но и загрязнением призабойной зоны в ходе вскрытия пласта. Если непроницаемая линза имеет сравнительно небольшие размеры, проведение гидравлического разрыва пласта с созданием протяженной трещины, выходящей за пределы линзы, позволяет ввести скважину в эксплуатацию. В случае, если скважина находится в низкопроницаемой области, гидроразрыв может привести к многократному увеличению дебита.

Все оценки эффективности ГРП, проведенные для однородного пласта, показывают, что после обработки дебит скважин увеличивается в 3–4 раза. Однако промысловый опыт часто дает более высокие показатели. Поэтому определенный интерес представляют расчетные методы оценки притока к скважинам после ГРП в неоднородных пластах.

В данном разделе предложена формула для расчета дебита скважины, находящейся в непроницаемой линзе, при условии, что трещина гидроразрыва, пересекающая скважину, выходит за пределы линзы. Эта зависимость может использоваться также для оценки дебита скважины с трещиной ГРП, вскрывающей низкопроницаемое включение.

Рассматривается плоское стационарное течение несжимаемой жидкости к скважине, пересеченной трещиной гидроразрыва от удаленного контура питания радиуса R_c . Предполагается, что скважина находится в центре непроницаемой линзы эллиптической формы с полуосями a и b . При $a = b$ линза имеет форму круга. Предполагается, что размеры линзы невелики по сравнению с радиусом контура питания: $f = \sqrt{a^2 - b^2} \ll 2R_c$. Полуудлина трещины l больше полуоси линзы, вдоль которой направлена трещина (рис. 8.1); кроме того, $l \ll 2R_c$. Значения давления на контуре трещины p_w и на удаленном контуре p_c постоянные. Фильтрация жидкости в пласте подчиняется закону Дарси, поэтому распределение потенциала описывается уравнением Лапласа.

Поскольку конформное отображение плоскости течения $Z = F(z)$, где $z = x + iy$, $Z = X + iY$, не изменяет уравнения Лапласа, это преобразование координат можно использовать для замены геометрических границ системы другими, более приемлемыми для аналитических расчетов [26, 81, 92]. Для решения данной задачи

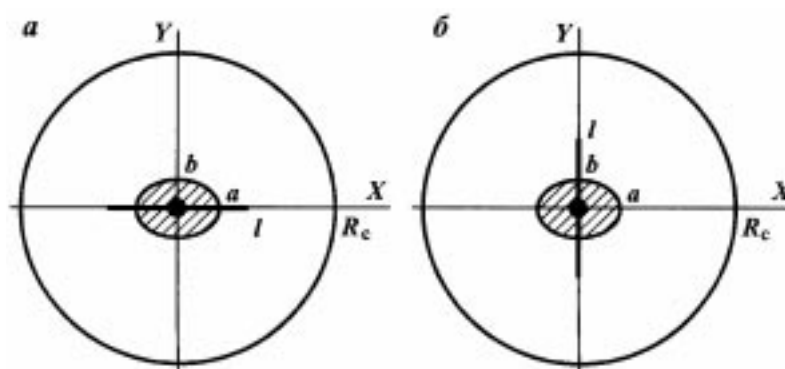


Рис. 8.1. Скважина с трещиной ГРП в непроницаемой линзе:
a – трещина направлена вдоль большой оси линзы; *b* – трещина направлена вдоль малой оси линзы

применяется последовательность конформных отображений [49].

В результате перехода к переменной z_1 , определяемой конформным преобразованием $z = \frac{f}{2} \left(z_1 + \frac{1}{z_1} \right)$, область фильтрации – внешность эллипса, ограничивающего непроницаемую линзу, – перейдет во внешность окружности радиуса $r_1 = \left(\frac{a+b}{a-b} \right)^{1/2}$.

При этом, поскольку $2R_c \gg f$, образ контура питания можно приближенно представить окружностью радиуса $R_1 = 2R_c/f$. Трещина перейдет в отрезок координатной оси x_1 или y_1 в зависимости от ее исходного направления относительно линзы. Длина этого отрезка, симметричного относительно начала координат, составит $2l_1$, где

$$l_1 = \frac{1}{f} + \sqrt{\frac{f^2}{f^2} \pm 1}. \text{ Знак "плюс" соответствует исходному направлению трещины вдоль малой оси линзы (рис. 8.1, б), знак "минус" – вдоль большой оси (рис. 8.1, а).}$$

Полученное течение может быть рассчитано как приток к двум одинаковым трещинам длиной $l_1 - r_1$, расположенным вдоль одной прямой (например, вдоль оси x_1), по разные стороны от непроницаемой круговой линзы (рис. 8.2, а). Учитывая симметрию течения, можно ограничиться рассмотрением одной четверти области фильтрации, например, $x_1 \geq 0$, $y_1 \geq 0$, приняв при этом, что участки границы, расположенные вдоль координатных осей, $l_1 \leq x_1 \leq R_1$ и $r_1 \leq y_1 \leq R_1$ непроницаемые.

Последовательность преобразований

$$z_2 = \ln \left[z_1 \sqrt{\frac{a-b}{a+b}} \right] - i \frac{\pi}{2};$$

$$\operatorname{sin} z_3 = \frac{2l_1 r_1}{l_1^2 + r_1^2} \operatorname{sin} \left(z_2 e^{i\pi/2} \right);$$

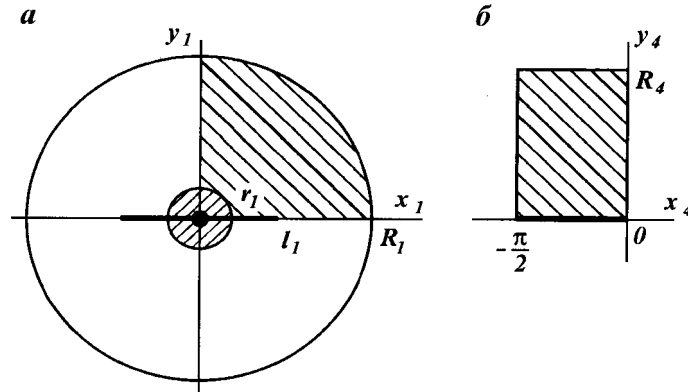


Рис. 8.2. Отображения области фильтрации

$$\operatorname{sin} z_4 = \frac{r_1^2 + R_1^2}{R_1^2 - r_1^2} \operatorname{sin} \left(z_3 - \frac{\pi}{2} \right)$$

отображает выделенную область плоскости z_1 на прямоугольник плоскости z_4 : $-\frac{\pi}{2} \leq x_4 \leq 0$, $0 \leq y_4 \leq R_4$, где $R_4 = \ln \frac{2R_1 r_1}{R_1^2 - r_1^2}$

(рис. 8.2, б). Здесь использовано условие $l \ll 2R_c$, которое позволяет приближенно представить образ контура питания отрезком $y_4 = R_4$, $-\pi/2 \leq x_4 \leq 0$. При этом отрезок оси x_1 , имитирующий часть трещины $r_1 \leq x_1 \leq l_1$, перейдет в противоположную сторону прямоугольника, лежащую на оси x_4 . Непроницаемые границы перейдут в две другие стороны прямоугольника, в том числе граница линзы отобразится на отрезок $x_4 = -\pi/2$, $0 \leq y_4 \leq \operatorname{arch} \frac{r_1^2 + R_1^2}{R_1^2 - r_1^2}$. В результате

течение преобразуется в плоскопараллельное; на изобарах, расположенных на расстоянии R_4 одна от другой, заданы давления p_w и p_c . Дебит линейного стока длины $\pi/2$ рассчитывается по формуле

$$Q_4 = \frac{\pi k h (p_c - p_w)}{2\mu R_4}.$$

Здесь k – проницаемость пласта, h – его толщина, μ – вязкость жидкости.

Поскольку рассматривался элемент симметрии, соответствующий четверти области фильтрации, искомое выражение для дебита скважины с трещиной гидроразрыва, вскрывающей непроницаемую линзу эллиптической формы, имеет вид

$$Q = 4q_4 = \frac{2\pi kh(p_c - p_w)}{\mu \ln R_c / r_e};$$

$$r_e = \frac{1 + \sqrt{I^2 \pm f^2}}{4} \left[1 - \left(\frac{a + b}{1 + \sqrt{I^2 \pm f^2}} \right)^2 \right]. \quad (8.1)$$

Здесь r_e – эффективный радиус скважины с трещиной ГРП; знаки “минус” и “плюс”, как и выше, соответствуют направлению трещины вдоль большой и малой оси линзы.

Для круговой линзы $a = b$ и выражение (8.1) упрощается:

$$r_e = (I^2 - a^2)/2I. \quad (8.2)$$

В однородном пласте $a = b = 0$, и формула (8.2) для определения эффективного радиуса скважины с трещиной гидроразрыва приобретает известный вид:

$$r_e = I/2. \quad (8.3)$$

Сопоставление выражений (8.1), (8.2) с формулой (8.3), полученной для однородного пласта, показывает, что если непроницаемая линза имеет форму круга, то дебит скважины с трещиной ГРП длиной $2I$ равен дебиту скважины с трещиной длиной $2I(1 - a^2/I^2)$ в однородном пласте. Если линза имеет вытянутую форму ($a \gg b$) и трещина направлена вдоль большой оси линзы, то для того, чтобы получить тот же дебит, в однородном пласте необходимо создать трещину длиной $2I\sqrt{1 - a^2/I^2}$. Если трещина направлена вдоль малой оси линзы вытянутой формы, то дебит скважины с трещиной ГРП, расположенной в центре линзы, практически совпадает с дебитом скважины, пересеченной трещиной такой же длины в однородном пласте, так как значения эффективного радиуса, вычисленные по формулам (8.1) и (8.3), почти не различаются.

Приведем некоторые количественные оценки. Допустим, что радиус контура питания 500 м. Если радиус круговой линзы, в которой расположена скважина, равен 50 м, а полудлина трещины гидроразрыва вдвое больше и составляет 100 м, то дебит скважины в неоднородном пласте всего на 12 %, или в 1,14 раза, ниже, чем в однородном, при той же длине трещины. Если радиус линзы равен 10 м, что составляет 10 % от полудлины трещины, то дебиты в однородном и неоднородном пластах практически не различаются. Аналогичный результат получаем для линзы эллиптической формы. Если трещина ГРП длиной $2l = 200$ м направлена вдоль большой оси линзы (см. рис. 8.1, *а*), размеры которой составляют $a = 70$ м, $b = 30$ м, то отношение дебита в однородном пласте к дебиту в неоднородном пласте при той же длине трещины составит 1,23. Если трещина направлена вдоль малой оси линзы (см. рис. 8.1, *б*), то при тех же размерах линзы и трещины отношение дебитов равно 1,07.

Таким образом, показана высокая эффективность гидравлического разрыва пласта для ввода в эксплуатацию скважин, находящихся в непроницаемых линзах небольших размеров. Проектирование технологии проведения ГРП с учетом необходимости создания трещины, длина которой хотя бы в 2 раза превышает диаметр линзы, позволит получить дебит, близкий к дебиту скважины с трещиной ГРП такой же длины в однородном пласте.

8.2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОРАЗРЫВА В СКВАЖИНЕ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В НИЗКОПРОНИЦАЕМОМ ВКЛЮЧЕНИИ, НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты, представленные в предыдущем разделе, хорошо согласуются с полученными при анализе производительности скважин с трещинами, находящихся в низкопроницаемых зонах. Проведение ГРП в таких скважинах позволяет значительно повысить их дебит. Если размеры области с ухудшенными фильтрационными характеристиками относительно невелики, особенно эффективным окажется гидроразрыв с созданием трещины, выходящей за пределы этой области. В работе [123] рассмотрено круговое низкопроницаемое включение, в центре которого находится скважина; при этом вертикальная трещина либо выходит за пределы

этого включения, либо целиком содержится внутри него. Если полудлина трещины хотя бы в 2 раза превышает радиус этой зоны, то скин-эффект, обусловленный загрязнением призабойной зоны, становится несущественным и не влияет на коэффициент продуктивности скважины после гидроразрыва.

В [51] приведены результаты расчетов по оценке эффективности гидроразрыва в скважине, расположенной внутри низкопроницаемого включения прямоугольной формы в центре элемента пятиточечной системы разработки, в зависимости от соотношения размеров включения и трещины. Численные расчеты проведены на базе трехмерной модели многофазной фильтрации, учитывающей трещины гидроразрыва [72]. В расчетах использованы реальные фазовые проницаемости и вязкости нефти и воды. Расстояние между скважинами в ряду R было принято равным 566 м, при этом расстояние между добывающей и нагнетательной скважинами составляло $R / \sqrt{2} = 400$ м. Низкопроницаемое включение представляло собой прямоугольник 100×300 м, в центре которого расположена добывающая скважина. Моделировался пласт постоянной толщиной 5 м и пористостью 0,2. Таким образом, объем включения составлял всего 9,4 % от объема всего пласта. Проницаемость основного пласта предполагалась равной $0,1 \text{ мкм}^2$, проницаемость включения – $0,001 \text{ мкм}^2$. Рассматривались случаи, когда оси симметрии включения параллельны рядам скважин (рис. 8.3, а) либо составляют с ними угол в 45° (рис. 8.3, б). Начальная нефтенасыщенность принята равной 0,8, начальная водонасыщенность – 0,2, вязкость нефти – $1,5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, вязкость воды – $0,5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$. Фазовые проницаемости нефти f_0 и воды f_w были заданы в следующем виде:

$$f_i = \left(\frac{s_i - 0,2}{0,8 - 0,2} \right)^3; \quad f_w = 0,4 \left(\frac{s_w - 0,2}{0,8 - 0,2} \right)^2,$$

где s_o и s_w – соответственно нефте- и водонасыщенность.

Между добывающими и нагнетательными скважинами поддерживался постоянный перепад давления 10 МПа.

Модель участка, соответствующего элементу симметрии пятиточечной системы, представляла собой сеточную область в форме прямоугольного параллелепипеда, покрытую равномерной разностной сеткой с ячейками $14,3 \times 14,3 \times 2,5 \text{ м}^3$.

Был рассчитан базовый вариант без применения ГРП, причем результаты расчетов для обоих случаев расположения включения, представленных на рис. 8.3, практически совпали. Это объясняется незначительными размерами включения по сравнению с размерами элемента.

Затем были смоделированы варианты с гидроразрывом в добывающей скважине. Полуудлина трещины составляла 100 м, раскрытие – 6 мм, проницаемость 80 мкм^2 . Рассматривались случаи с различной ориентацией трещины. Если трещина параллельна большей стороне включения, то она целиком содержится в низкопроницаемой области

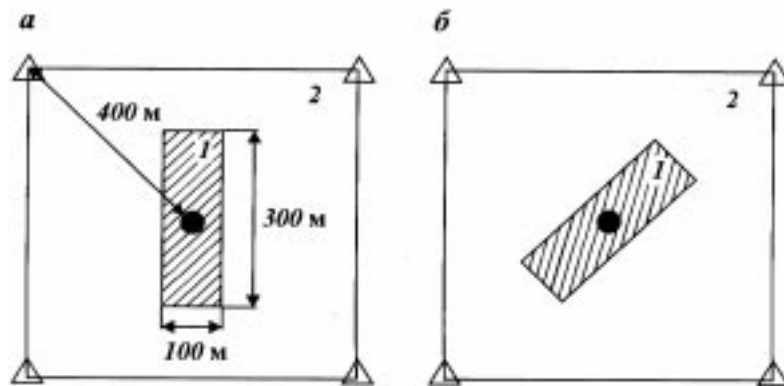


Рис. 8.3. Элемент пятиточечной системы с прямоугольным низкопроницаемым включением (1) в центре однородного пласта (2): а – оси симметрии включения параллельны рядам скважин; б – оси симметрии включения составляют 45° с рядами скважин

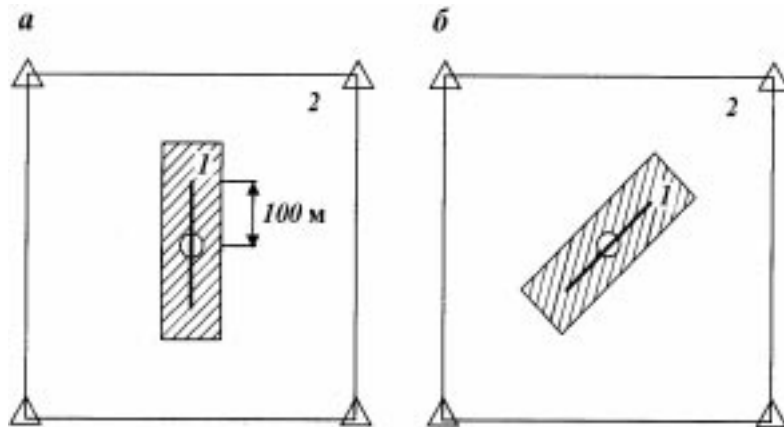


Рис. 8.4. Элемент пятиточечной системы с прямоугольным низкопроницаемым включением (1) в центре однородного пласта (2). ГРП в добывающей скважине, трещина – внутри включения:
a – оси симметрии включения параллельны рядам скважин; *б* – оси симметрии включения составляют 45° с рядами скважин

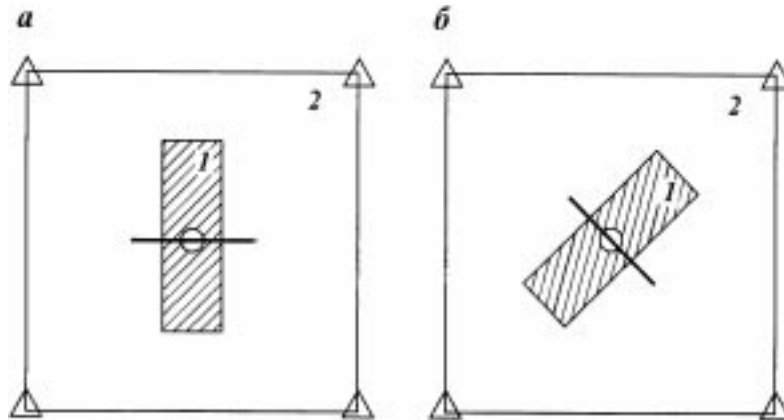


Рис. 8.5. Элемент пятиточечной системы с прямоугольным низкопроницаемым включением (1) в центре однородного пласта (2). ГРП в добывающей скважине, трещина выходит за пределы включения:
a – оси симметрии включения параллельны рядам скважин; *б* – оси симметрии включения составляют 45° с рядами скважин

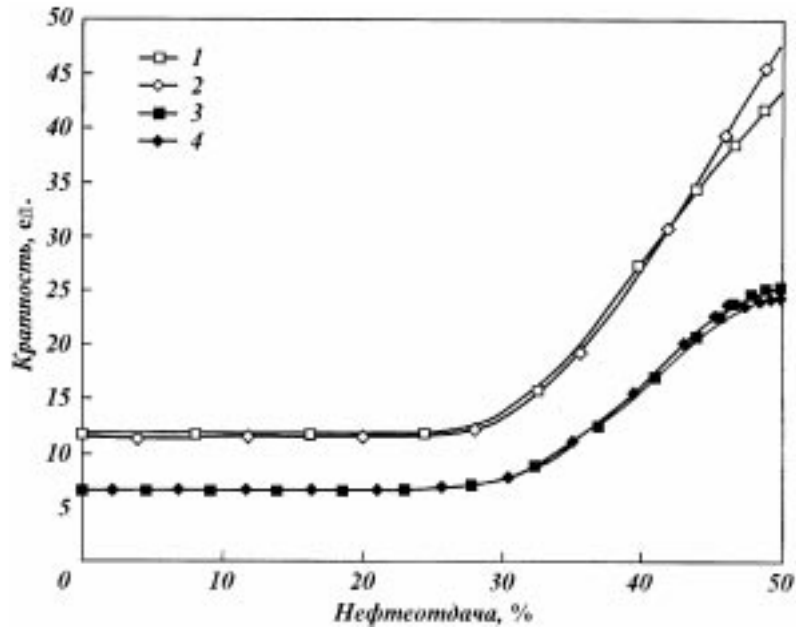


Рис. 8.6. Кратность увеличения темпа отбора нефти.
Трещина ГРП выходит из включения: 1 – вдоль оси, 2 – по диагонали; трещина ГРП целиком во включении: 3 – вдоль оси, 4 – по диагонали

(рис. 8.4). Если трещина проходит в ортогональном направлении, то ее крылья наполовину выходят за пределы включения (рис. 8.5).

Расчеты показали, что дебит скважины после ГРП в основном определяется ориентацией трещины относительно включения и оказывается существенно выше, если трещина выходит за пределы низкопроницаемого включения. Различия, связанные с расположением включения относительно сетки скважин (варианты “а” и “б” на рис. 8.4, 8.5), оказались несущественными, так как размеры включения и полудлина трещины невелики по сравнению с расстоянием между скважинами. На рис. 8.6 приведен график кратности увеличения темпа отбора нефти в результате ГРП, показывающий, во сколько раз быстрее достигается то или иное значение нефтеотдачи в вариантах с ГРП по отношению к варианту без гидроразрыва. Если трещина целиком содержится внутри низкопроницаемого включения, то дебит нефти в результате ГРП

возрастает в 6,7 раза. Если трещина выходит за пределы включения на половину своей длины, то дебит увеличивается в 11,5 раза.

Таким образом, гидроразрыв пласта в скважинах, вскрывающих области с пониженной проницаемостью или имеющих загрязненную призабойную зону, приводит к многократному увеличению дебита и при грамотном определении параметров трещины позволяет не только восстановить производительность скважины, но и приблизить ее к величине, рассчитываемой для скважины с трещиной ГРП в однородном пласте.

8.3. ВЛИЯНИЕ ГИДРОРАЗРЫВА В СЛОИСТОМ ПЛАСТЕ НА ВЫРАБОТКУ ЗАПАСОВ ОТДЕЛЬНЫХ СЛОЕВ

Гидравлический разрыв пласта приводит к кратному увеличению коэффициента продуктивности скважин и при проектировании его использования как элемента системы разработки увеличивает полноту выработки запасов углеводородов. В слоистом пласте этот эффект проявляется по-разному для отдельных слоев и определяется степенью их сообщаемости, толщиной и проницаемостью каждого слоя, длиной и проводимостью трещины. Кратность увеличения дебита скважины существенным образом зависит от того, создается ли единая трещина или гидроразрыв проводится селективно, и параметры трещины подбираются для каждого слоя в отдельности [48].

В данном разделе анализируется дебит скважины после ГРП в слоистом пласте и оценивается величина притока из каждого слоя. Рассматривается стационарная фильтрация несжимаемой жидкости к скважине, пересеченной трещиной, расположенной в центре слоистого пласта с удаленным контуром питания радиуса R_c . Кровля и подошва пласта непроницаемые. Предполагается, что пласт состоит из N горизонтальных слоев проницаемостью k_i и толщиной h_i , $i = 1, \dots, N$. Давления на удаленном контуре и на забое скважины распределены по гидростатическому закону, соответствующие значения на кровле пласта постоянны и составляют p_c и p_w . Рассматриваются случаи сообщающихся слоев и слоев, разделенных непроницаемыми перемычками.

1. Сообщающиеся слои. Предполагается, что пласт вскрыт по всей толщине единой вертикальной трещиной гидроразрыва ко-

нечной проницаемости k_f (рис. 8.7). Горизонтальное сечение трещины – эллипс с полуосями l и w , соответствующими полудлине и полурастворению трещины.

Уравнения движения и неразрывности в каждом слое пласта имеют вид

$$u_i = -\frac{k_i}{\mu} \nabla_h p_i; \quad v_i = -\frac{k_i}{\mu} \left(\frac{\partial p_i}{\partial z} + \gamma \right);$$

$$k_i \left(\Delta_h^2 p_i + \frac{\partial^2 p_i}{\partial z^2} \right) = 0; \quad i = 1, \dots, N. \quad (8.4)$$

Здесь u_i и v_i – горизонтальная и вертикальная компоненты скорости, p_i – давление в i -м слое, μ и γ – вязкость и удельный вес жидкости, ось z направлена вертикально вверх. На границах между слоями выполняются условия равенства давлений и нормальных компонент скорости:

$$\Gamma_{i+1} : p_i = p_{i+1}; \quad k_i \left(\frac{\partial p_i}{\partial z} + \gamma \right) = k_{i+1} \left(\frac{\partial p_{i+1}}{\partial z} + \gamma \right); \quad i = 1, \dots, N-1. \quad (8.5)$$

Среднее давление для каждого слоя $\langle p_i \rangle$ и средневзвешенное давление для всего пласта $\langle p \rangle$ определяются следующим образом:

$$\langle p_i \rangle = \frac{1}{h_i} \int_0^{h_i} p_i dz; \quad \langle p \rangle = \frac{1}{\langle k \rangle H} \sum_{i=1}^N k_i h_i \langle p_i \rangle; \quad \langle k \rangle = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^N k_i h_i; \quad H = \sum_{i=1}^N h_i.$$

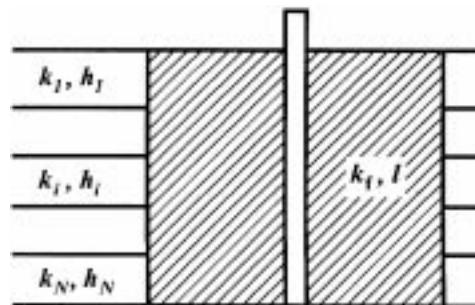


Рис. 8.7. Слоистый пласт, вскрытый единой трещиной гидроразрыва

Здесь $\langle k \rangle$ – средняя проницаемость, H – толщина пласта.

Если q_i – переток жидкости из слоя i в соседние слои, то средние давления удовлетворяют уравнениям, вытекающим из (8.4), (8.5):

$$\Delta_n^2 \langle p \rangle = 0; \quad k_i h_i \Delta_n^2 \langle p_i \rangle = q_i; \quad \sum_{i=1}^N q_i = 0. \quad (8.6)$$

Полагая течение в трещине параллельным горизонтальной плоскости, а давление p_f распределенным по гидростатическому закону, получим

$$\Delta_n^2 p_f = 0. \quad (8.7)$$

Вдоль границы, разделяющей пласт и трещину, выполняются условия сопряжения:

$$p_f = p_i; \quad k_f \frac{\partial p_f}{\partial n} = k_i \frac{\partial p_i}{\partial n}; \quad i = 1, \dots, N, \quad (8.8)$$

где n – направление нормали к контуру трещины.

Средневзвешенное давление в трещине $\langle p_f \rangle = \frac{1}{\langle k \rangle H} \sum_{i=1}^N k_i \int_0^{h_i} p_f dz$ удовлетворяет уравнению (8.7), а условия сопряжения (8.8) для средневзвешенных давлений имеют вид

$$\langle p_f \rangle = \langle p \rangle; \quad k_f \frac{\partial \langle p_f \rangle}{\partial n} = \langle k \rangle \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial n}.$$

Таким образом, задача о притоке к скважине с вертикальной трещиной гидроразрыва в мощном слоистом пласте сведена к аналогичной задаче на плоскости, решение которой получено в главе 3. Дебит скважины вычисляется по формуле (3.27), где в качестве проницаемости пласта используется средняя проницаемость:

$$Q = Q_0 \frac{\ln R_c / r_w}{\ln R_c / r_e}; \quad Q_0 = \frac{2\pi \langle k \rangle H (p_c - p_w)}{\mu \ln R_c / r_w};$$

$$\ln r_e = (1 - \lambda) \ln r_w + \lambda \ln \frac{f}{2} - (1 - \lambda) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{q^{4m} \lambda}{m(1 - q^{4m} \lambda)}; \quad (8.9)$$

$$q = \sqrt{\frac{1-w}{1+w}}; \quad \lambda = \frac{k_f - \langle k \rangle}{k_f + \langle k \rangle}.$$

Здесь Q_0 – дебит скважины до гидроразрыва, r_w – радиус скважины. Эффективный радиус скважины, пересеченной трещиной ГРП, r_e зависит от соотношения средней проницаемости пласта и проницаемости трещины λ , а также от геометрических размеров трещины.

Асимптотический анализ продольного течения флюидов в коллекторе, характерный вертикальный размер которого много меньше горизонтального [38, 39], показал, что система уравнений двумерной фильтрации может быть существенно упрощена при крупномасштабном описании процесса, когда слагаемыми порядка $H^2 k_x / R_c^2 k_z$ можно пренебречь. Здесь H – характерный вертикальный размер пласта или его толщина; R_c – характерный продольный размер или радиус контура питания; $\sqrt{k_x / k_z}$ – коэффициент анизотропии. При этом распределение давления по вертикали в пласте без изолирующих прослоев в зависимости от соотношения гравитационных и гидродинамических сил $\gamma H / (p_c - p_w)$ либо постоянно, либо подчиняется гидростатическому закону [63, 64]. Причем постоянство давления имеет место лишь в том случае, когда действие гравитации несущественно по сравнению с гидродинамическим перепадом давления. Таким образом, в крупномасштабном приближении в обоих случаях вертикальными перетоками можно пренебречь, т.е. в уравнениях (8.6) $q_i = 0$. При этом поток из каждого слоя пласта в трещину Q_i пропорционален проводимости слоя $k_i h_i$:

$$Q_i = \frac{k_i h_i}{\langle k \rangle H} Q_0 \frac{\ln R_c / r_w}{\ln R_c / r_e}. \quad (8.10)$$

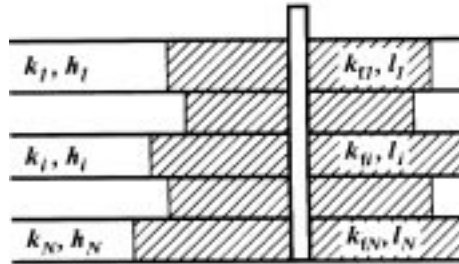
Поэтому согласно выражениям (8.9), (8.10) кратность увеличения Q_i вследствие ГРП зависит от эффективного радиуса r_e и помимо параметров трещины определяется только средней прони-

цаемостью слоистого пласта. Следовательно, при создании общей трещины ГРП эффект для высокопроницаемого и для низкопроницаемого слоя оказывается одинаковым. Такие же значения дебитов каждого слоя могут быть получены, если слои разделены и работают независимо, а проницаемость индивидуальной трещины ГРП в каждом слое пропорциональна соответствующей проницаемости пласта. Например, случай двухслойного пласта с сообщающимися слоями равной толщины $h_1 = h_2$ при $k_1 = 10^{-13}$ мкм², $k_2 = 10^{-15}$ мкм², в котором создана единая трещина на всю толщину пласта и $k_f = 10^{-10}$ мкм², аналогичен случаю пласта с разобращенными слоями, если в высокопроницаемом слое создана трещина с проницаемостью $k_{f1} = 1,98 \cdot 10^{-10}$ мкм², а в низкопроницаемом – с проницаемостью $k_{f2} = 1,98 \cdot 10^{-12}$ мкм², причем длины трещин совпадают.

2. Изолированные слои. Если слои разделены непроницаемыми перемычками и вскрыты единой трещиной гидроразрыва, проходящей через всю толщину пласта, уравнения для среднего давления и формулы для определения суммарного дебита и дебитов из отдельных слоев имеют такой же вид, как и в случае сообщающихся слоев. Кратность увеличения дебитов в результате ГРП определяется только средней проницаемостью пласта, геометрическими размерами и проницаемостью трещины.

Если гидроразрыв проводится селективно для каждого слоя и создаваемые трещины характеризуются своей геометрией и проницаемостью (рис. 8.8), то эффект от ГРП в каждом слое оценивается независимо и определяется только размерами трещины и соотношением проницаемости данного слоя и трещины. Использование усредненных характеристик в данном случае приводит к потере информации. Проведение селективного гидроразрыва и определение параметров трещины для каждого слоя в отдельности более эффективно. Например, увеличивая длину трещины в низкопроницаемом слое по сравнению с высокопроницаемым, можно добиться увеличения доли продукции этого слоя в общем потоке, что может оказаться весьма актуальным при проведении ГРП на стадии, когда высокопроницаемые слои обводнены.

Рис. 8.8. Слоистый пласт с разобщенными слоями, вскрытыми отдельными трещинами гидроразрыва



В зависимости от целей задача оптимизации селективного ГРП в слоистом пласте с разобщенными слоями может быть сформулирована по-разному. В случае, если целью является максимизация коэффициента продуктивности скважины при заданном суммарном объеме трещин, определяемом расходом проппанта и жидкости разрыва, имеем:

$$\max \sum_{i=1}^N \frac{k_i h_i}{\ln 2R_c / l_i} \quad \text{при условии} \quad \sum_{i=1}^N h_i l_i = HL. \quad (8.11)$$

Здесь l_i – полудлина трещины в i -м слое, L – средняя длина, зависящая от суммарного объема трещин. Для простоты принято, что перепадом давления в трещине можно пренебречь, вдоль ее границы давление равно забойному и поэтому эффективный радиус скважины $r_{ei} = l_i/2$. Средняя ширина трещин во всех слоях принята одинаковой, поэтому суммарный объем трещин определяется величиной $\sum_{i=1}^N h_i l_i$. Решение задачи (8.11) может быть получено

методом множителей Лагранжа [70]:

$$\sqrt{\frac{l_i}{k_i}} \ln \frac{2R_c}{l_i} = \text{const} \quad i = 1, \dots, N, \quad (8.12)$$

Условие (8.12) означает, что максимальное значение коэффициента продуктивности скважины достигается при определении длины трещины для каждого слоя в зависимости от его проницаемости, причем слою большей проницаемости соответствуют трещины большей длины. Это связано с тем, что вклад высокопроницаемых слоев в общий дебит наибольший. Отсюда, в частности, следует, что в двухслойном пласте при $k_1/k_2 = 100$ практически

при любом заданном суммарном объеме трещин гидроразрыв в низкопроницаемом слое нецелесообразен. Аналогичный результат получен в [121] для случая неустановившейся фильтрации в двухслойном пласте.

Если высокопроницаемые слои уже обводнены и целью оптимизации является максимизация дебита нефти, то в выражениях (8.11), (8.12) помимо абсолютных проницаемостей следует учитывать текущие значения фазовой проницаемости для нефти в каждом слое.

Таким образом, в случае создания единой трещины гидроразрыва, проходящей через всю толщу слоистого пласта, эффективность ГРП не зависит от распределения абсолютной проницаемости по слоям и определяется только средней проницаемостью пласта, размерами и проводимостью трещины. Этими же параметрами определяется кратность увеличения притока из каждого слоя. В слоистом пласте с изолированными слоями наиболее эффективен селективный гидроразрыв, когда в каждом слое создается отдельная трещина, а ее размеры и проводимость определяются с учетом свойств данного слоя. Для достижения максимальной производительности скважины при заданном суммарном объеме трещин ГРП длины трещин в каждом слое должны удовлетворять условиям (8.12).