

Моделирование гидропрослушивания в скважинах с вертикальными техногенными магистральными трещинами гидроразрыва

Давлетбаев А.Я., Нуриев Р.И.

Башкирский государственный университет, Уфа

Рассматривается задача о распространении поля давления в системе с двумя скважинами с единичными магистральными техногенными трещинами гидроразрыва в низкопроницаемой пористой среде. Выполнено численное моделирование задачи, анализ чувствительности на параметры системы, смоделировано гидродинамическое исследование методом гидропрослушивания. Численная модель использовалась для решения обратной задачи и оценки параметров системы по измеренным промышленным данным.

1. Введение

В настоящее время при разработке низкопроницаемых коллекторов масштабно применяется гидроразрыв пласта (ГРП). ГРП выполняется как в добывающих, так и в нагнетательных скважинах. При существующих объемах закачки пропанта полудлина трещин ГРП в добывающих скважинах достигает 150–200 м. При выполнении ГРП в зонах бурения новых скважин (в зонах, в которых нет существенного изменения полей давления и температуры) трещины преимущественно развиваются вдоль линий регионального стресса, если такая анизотропия существует [1].

Точные аналитические решения задач о моделировании гидропрослушивания для скважин с параллельными техногенными трещинами представлены в работе [2]. В работе [3] математическая модель скважин с трещиной и без трещины использовалась для обработки результатов исследований методом гидропрослушивания и для оценки параметров системы. Случай исследования в неоднородном пласте с проводящим разломом или трещиной рассмотрен в работе [4]. В данной работе рассматриваются наиболее вероятные геометрии скважин с трещинами для гидропрослушивания из работы [5], обоснована и выбрана модель для интерпретации, оценены параметры трещины и пласта. Согласно промышленным данным трещина образовалась вследствие превышения давления закачки над давлением разрушения породы. При постановке задачи предполагается, что давление закачки в скважине превышает давление смыкания трещины, т.е. ее геометрия (высота, длина, раскрытие) постоянна.

2. Математическая модель

Рассматривается один из элементов симметричной расстановки с двумя скважинами, которые пересекаются единичными вертикальными техногенными трещинами гидроразрыва. При этом скважины находятся в рядной системе разработки и одинаково ориентированы вдоль линии региональных стрессов. Проницаемости трещин, которые заполнены песком, существенно превышают проницаемость пласта. Техногенные трещины симметричные, параллельны оси Ox , имеют длины x_{f1} и x_{f2} , одинаковые раскрытия w_f , проницаемость k_f , имеют прямоугольную форму. Границы пластов удалены от техногенных трещин на расстояние L . Концы техногенных трещин удалены на расстояние d .

Полагается, что пласт изотропный, т.е. $k_{mx} = k_{my}$. Продуктивный пласт имеет постоянную толщину h , которая совпадает с высотой трещин. Кровля и подошва пласта непроницаемы. Здесь x и y — декартовы координаты; p — давление жидкости, распределение которого в пласте описывается уравнением Лапласа. В виду симметрии задачи относительно оси Ox (вдоль трещин) рассматривалась половина расчетной области. Течение в трещинах предполагается одномерным. Жидкость маложимаемая, ее вязкость постоянна. Распределение давления в трещинах, которое меняется по их длине и постоянно в каждом вертикальном сечении, описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 p_f}{\partial x^2} + \frac{\mu}{k_f} \frac{q}{w_f h} = \frac{\phi_f \mu c_{ft}}{k_f} \frac{\partial p_f}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} L \leq x \leq L + 2x_{f1}, \quad L + 2x_{f1} + d \leq x \leq r \\ \leq L + 2x_{f1} + d + 2x_{f2}, \quad 0 \leq y \leq w_f, \end{aligned}$$

в пласте (матрице):

$$\frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_m}{\partial y^2} = \frac{\phi_m \mu c_{mt}}{k_m} \frac{\partial p_m}{\partial t}. \quad (2)$$

Приток осуществляется через боковые поверхности трещины. Течение на границах «трещина–пласт» в возмущающей скважине описывается выражением:

$$q = - \int_L^{L+2x_{f1}} \frac{k_m}{\mu} \frac{\partial P_m}{\partial y} \Big|_{y=w_f/2} dx, \quad (3)$$

в наблюдательной скважине:

$$q = - \int_{L+2x_{f1}+d}^{L+2x_{f1}+d+2x_{f2}} \frac{k_m}{\mu} \frac{\partial P_m}{\partial y} \Big|_{y=w_f/2} dx. \quad (4)$$

Краевые условия в начальный момент времени в системе «трещина–пласт» и на рассматриваемых границах пласта предполагают постоянное начальное давление:

$$\begin{aligned} p_m|_{t=0} = p_f|_{t=0} = p_i, \\ p_m|_{y=L} = p_m|_{x=0} = p_m|_{x=2L+2x_{f1}+2x_{f2}+d} = p_i. \end{aligned} \quad (5)$$

На границах «трещина–пласт» равенство давлений и фильтрационных потоков:

$$\begin{aligned} \frac{k_f}{\mu} \frac{\partial P_f}{\partial y} \Big|_{y=w_f/2} = \frac{k_m}{\mu} \frac{\partial P_m}{\partial y} \Big|_{y=w_f/2}, \\ P_f \Big|_{y=w_f/2} = P_m \Big|_{y=w_f/2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Условие симметрии относительно оси (вдоль трещин):

$$\frac{\partial P_f}{\partial x} \Big|_{y=0} = \frac{\partial P_m}{\partial x} \Big|_{y=0} = 0. \quad (7)$$

Граничные условия в скважинах определяются режимом работы, т.е. с помощью задания давления или расхода закачиваемой жидкости:

$$P_f \Big|_{x=L+x_{f1}, y=0} = p_w, \quad (8)$$

$$\frac{\partial P_f}{\partial x} \Big|_{x=L+x_{f1}, y=0} = \frac{-Q_w \mu}{2k_f w_f h}. \quad (9)$$

Здесь p_f , p_m — давления в трещине и в матрице; μ — вязкость пластовой жидкости; w_f — раскрытие трещины; k_f — проницаемость трещины; L — расстояние до границ пласта; k_m — проницаемость пласта; h — высота продуктивного пласта; ϕ_m и ϕ_f — пористость пласта и трещины; c_{mt} и c_{ft} — общая сжимаемость в пласте и в трещине; x_{f1} и x_{f2} — длины

техногенных трещин в скважинах; d — расстояние (перемычка) между концами трещин; p_i — начальное пластовое давление; q — интенсивность стока/притока вдоль границ «трещина–пласт»; p_w — давление в скважине; Q_w — расход закачиваемой жидкости в возмущающую скважину.

3. Влияние перемычки между трещинами на отклик давления

Система уравнений (1)–(4) с краевыми условиями (5)–(9) решалась методом конечных разностей по итерационной схеме Ньютона на неравномерной прямоугольной разностной сетке [6]. Точность аппроксимации предварительно проверялась на точном решении для случая скважины с единичной вертикальной трещиной конечной проводимости [7]. Расчеты задачи проводились при следующих параметрах среды: $k_m = 1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$; $\mu = 0.3 \text{ мПа}\cdot\text{с}$; $L = 500 \text{ м}$; $h = 21.23 \text{ м}$; $\phi_m = 0.16668$; $\phi_f = 0.414$; $c_{mt} = 3.6687 \cdot 10^{-9} \text{ 1/Па}$; $c_{ft} = 9.4845 \cdot 10^{-9} \text{ 1/Па}$; $d = 1, 5, 10, 30, 100, 200, 500 \text{ м}$; $x_{f1} = 900 - d \text{ м}$; $x_{f2} = 100 \text{ м}$; $k_f w_f = 10 \text{ м}^2 \cdot \text{м}$; $p_i = 27 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Для изучения влияния перемычки пористой среды между концами техногенных трещин выполнено моделирование исследования методом импульсного теста. В возмущающей скважине задавались различные режимы работы за счет изменения граничного условия. На режимах закачки задавалось постоянное давление в стволе скважины — краевое условие (8) и на этапах остановки использовалось краевое условие (9) при нулевом дебите. В наблюдательной скважине воспроизводились отклики давления на эти возмущения. На рис. 1 приведены общий вид кривой изменения в возмущающей скважине (рис. 1(a)) и смоделированные отклики давления в наблюдательной скважине для различных значений расстояния между концами трещин: $d = 3, 10, 30 \text{ м}$ (рис. 1(b)) и $d = 100, 200, 500 \text{ м}$ (рис. 1(c)). Из рисунка видно, что при $d > 30 \text{ м}$ отклик давления в наблюдательной скважине малозаметный. В реальных промысловых условиях при наличии зашумления измеренных данных и невысокой точности измерительного оборудования распознавания этого отклика было бы затруднительно. При $d \leq 30 \text{ м}$ (рис. 1(b)) реакция на возмущения выделяется однозначно. Чем меньше расстояние между концами трещины, тем больше амплитуда отклика давления в наблюдательной скважине.

На рис. 2 приведены профили давления вдоль оси Ox с трещинами при $d = 800 \text{ м}$ (рис. 2(a)), $d = 30 \text{ м}$ (рис. 2(b)) в моменты времени t равны 1 и 30 сут. В случае с $d = 800 \text{ м}$ (рис. 2(a)) давление

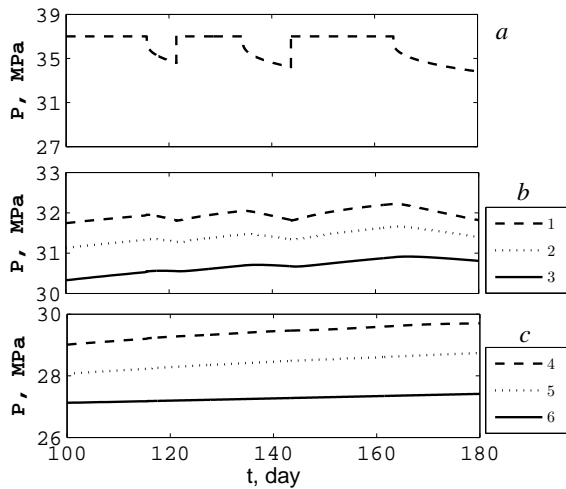


Рис. 1. Импульс давления в возмущающей скважине (а) и отклик в наблюдательной скважине (b, c): 1 — $d = 3$ м; 2 — $d = 10$ м; 3 — $d = 30$ м (b); 4 — $d = 100$ м; 5 — $d = 200$ м; 6 — $d = 500$ м (c)

распределилось только вдоль трещины в возмущающей скважине, давление в наблюдательной скважине практически равно начальному пластовому давлению. Из сопоставления профилей с $d = 30$ м (рис. 2(b)) видно что, чем больше расстояние между трещинами, тем значительнее потери давления между возмущающей и наблюдательной скважинами.

Наличие даже незначительной перемычки пористой среды с низкими фильтрационными свойствами приводит к значительным потерям импульса давления между возмущающей и наблюдательной скважинами. При этом согласно результатам исследований, представленным в работе [5], отклик в наблюдательной скважине на изменение давления в возмущающей скважине практически мгновенный, а разница в абсолютных значения давлений в скважинах значительно меньше, чем в представленных расчетах (рис. 2–4). Таким образом, для обработки результатов промыслового исследования стоит рассмотреть случай с двумя техногенными трещинами без пористой перемычки $d = 0$.

4. Случай трещин без перемычки

Случай с единичной техногенной трещиной, которая пересекает возмущающую и наблюдательную скважины, рассмотрен далее. Трещина имеет длину $2x_{f1} + 2x_{f2}$ и перемычка пористой среды между концами трещин отсутствует $d = 0$. В данной системе время отклика на возмущение и пе-

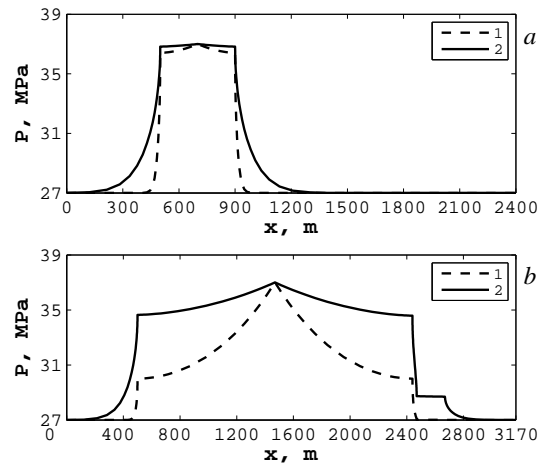


Рис. 2. Распределение давления вдоль трещины при $d = 800$ м (а), $d = 30$ м (b) в моменты времени 1 — $t = 1$ сут; 2 — $t = 30$ сут

репад давления между возмущающей и наблюдательной скважинами в значительной степени будет определяться проводимостью трещины:

$$F_{CD} = \frac{k_f w_f}{k_m(x_{f1} + x_{f2})}.$$

На рис. 3 показана чувствительность кривых изменения давления в возмущающей и наблюдательной скважинах на проводимость техногенной трещины, расчеты проведены при $F_{CD} = 25$ (рис. 3(a)), $F_{CD} = 100$ (рис. 3(b)). Из рисунка видно что, чем больше проводимость трещины, тем больше совпадение изменения давления на режимах работы возмущающей скважины и ближе абсолютные значения давлений в скважинах.

5. Интерпретация промыслового исследования

Математическая модель использовалась для интерпретации результатов гидропрослушивания в возмущающей и наблюдательной скважинах. Задавались история по приемистости возмущающей скважины, и воспроизводилась теоретическая кривая изменения давления в наблюдательной скважине. На рис. 4 представлены результаты наилучшего совмещения для теоретической и измеренной кривых для возмущающей скважины (рис. 4(a)) и наблюдательной скважины (рис. 4(b)). Наилучшее совмещение было получено при проводимости трещины $F_{CD} = 58.5$, фазовой проницаемости матрицы по воде $k_m = 0.293 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ и пластовом давлении $p_i = 33.13 \text{ МПа}$.

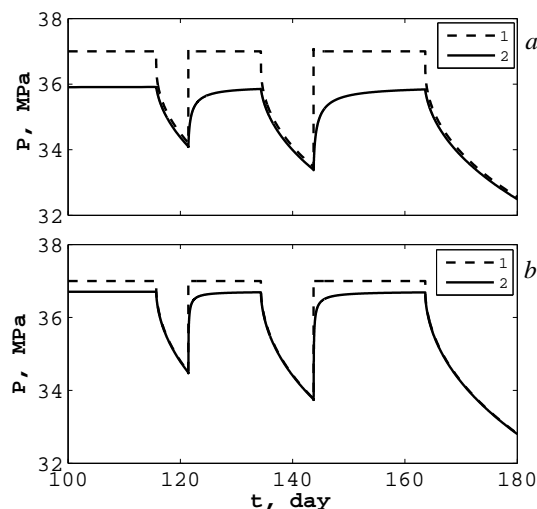


Рис. 3. Изменение давления в возмущающей (1) и наблюдательной скважинах (2) при $F_{CD} = 25$ (a), $F_{CD} = 100$ (b)

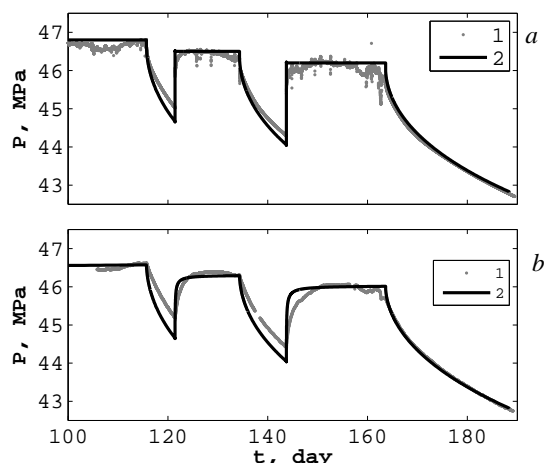


Рис. 4. Изменение давления в возмущающей (a) и наблюдательной скважинах (b): 1 — промысловые данные; 2 — теоретические расчеты

6. Заключение

Получено приближенное численное решение задачи о фильтрации жидкости в системе скважин с техногенными трещинами, смоделированы исследования методом гидропрослушивания. Путем моделирования установлено, что техногенные трещины возмущающей и наблюдательной скважин не имеют пористой перемычки. Выполнено совмещение теоретических данных с промысловыми данными

ми, получены оценки безразмерной проводимости техногенной трещины $F_{CD}=58.5$ и фазовой проницаемости матрицы по воде $k_m = 0.293 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Список литературы

- [1] Байков В.А., Жданов Р.М., Муллагалиев Т.И., Усманов Т.С. Выбор оптимальной системы разработки для месторождений с низкопроницаемыми коллекторами // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 1. С. 84–98. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Baikov/Baikov_2.pdf.
- [2] Mousli N.A., Raghavan R., Cinci-Ley H., Samaniego V.F. The influence of vertical fractures intercepting active and observation wells on influence tests // SPE 9346. 1982.
- [3] Cooper K.J., Collins R.E. Applications of transient pressure interference tests to fractured and nonfractured injection wells // SPE 19795. 1989.
- [4] Abbaszadeh M., Asakawa K., Cinco-Ley H., Arihara N. Interference testing in reservoirs with conductive faults or fractures // SPE 38941. 1997.
- [5] Davletbaev A., Baikov V., Ozkan E., Garipov T., Usmanov T., Asmandiyarov R., Slabetskiy A., Nazargalin E. Multi-Layer Steady-State Injection Test with Higher Bottomhole Pressure than the Formation Fracturing Pressure // SPE 136199. 2010.
- [6] Aziz K., Settari A. Petroleum reservoir simulation // York: Elsevier Applied Science Publishers. 1979.
- [7] Cinco-Ley H., Samaniego V.F., Dominguez A.N. Transient pressure behavior for a well with a finite-conductivity vertical fracture // SPE 6014. 1978.