

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ НА ТЕМП ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗАБОЙНОГО ДАВЛЕНИЯ В НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ ПЛАСТАХ

Дударева О.В., к.ф.-м.н., доцент
Бирский филиал УУНиТ, г. Бирск, Россия

Аннотация. В статье исследовано нестационарное течение жидкости в низкопроницаемом коллекторе, подчиняющееся нелинейному закону фильтрации с предельным градиентом давления. Численно решена краевая задача о восстановлении забойного давления после остановки скважины. Установлено, что нелинейные эффекты существенно замедляют процесс восстановления давления.

Ключевые слова: низкопроницаемые коллектора, пороговый градиент давления, восстановление давления.

В последние годы структура углеводородных запасов заметно ухудшается, и более актуальными становятся задачи поиска и вовлечения в разработку низко- и сверхнизкопроницаемых коллекторов. В таких средах фильтрационные процессы идут не по классическому линейному закону Дарси, а подчиняются более сложным зависимостям. Связь между скоростью фильтрации и градиентом давления здесь описывается нелинейной функцией, включающей пороговый градиент. В работах [2-3] на основе экспериментальных данных [1] был предложен нелинейный закон фильтрации.

Сформулируем задачу о нестационарном течении жидкости, связанном с динамикой забойного давления при изменении дебита скважины. Приток к скважине радиусом r_c , подчиняется нелинейному закону фильтрации, описанному в [2-3]. Начальный момент времени характеризуется постоянным распределением давления во всей системе «пласт — забой скважины», равным p_0 . Соответственно, начальное условие в пласте принимает вид:

$$t = 0, r_c < r < \infty: p = p_0. \quad (1)$$

Предположим, что в начальный момент времени $t = 0$ в невозмущённом полубесконечном пласте, где поддерживается постоянное давление p_0 , начинает работать добывающая скважина с фиксированным объёмным дебитом Q_0 . Затем, на временном интервале $[t_1, t_*]$ происходит нелинейное снижение её производительности — от исходного значения Q_0 до конечного Q_e [4-5].

Отсюда зависимость дебита от времени можно представить как:

$$Q = \begin{cases} Q_0, & 0 < t < t_1, \\ Q_0 + \frac{(Q_e - Q_0)(t - t_1)}{t_*}, & t_1 \leq t \leq t_1 + t_*, \\ Q_e, & t > t_1 + t_*, \end{cases} \quad (2)$$

где t_1 — момент прекращения отбора жидкости.

Для упругого режима фильтрации основополагающее дифференциальное соотношение можно представить как:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\chi}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \left(1 - \left(q / \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \right)^\gamma \right) \right), \quad r_c \leq r \leq \tilde{R}, \quad |\partial p / \partial r| \geq q / (1 - \varepsilon)^{1/\gamma}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\varepsilon \chi}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right), \quad \tilde{R} \leq r \leq R_0, \quad |\partial p / \partial r| < q / (1 - \varepsilon)^{1/\gamma}.$$

На границе скважины краевое условие выглядят следующим образом:

$$t > 0, r = r_c: 2\pi r h_c \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dr} \left(1 - \left(q / \frac{dp}{dr} \right)^\gamma \right) = Q, \quad (4)$$

где h_c — длина вскрытой части скважины.

Предположим, что в момент времени t_1 добывающая скважина полностью глушится ($Q_e = 0$), то есть приток флюида к забою прекращается. В такой постановке граничные условия на забое скважины (2) и (4) примут вид

$$t \geq t_1, r = r_c: \frac{dp}{dr} = q. \quad (5)$$

Краевое условие на внешней границе пласта (контуре питания) представим в следующем виде:

$$t > 0, r = \infty: p = p_0. \quad (6)$$

Величину снижения давления между удалённой зоной пласта p_0 и скважинной стенкой $p_e(t)$ обозначим через

$$\Delta p_e(t) = p_0 - p_e(t). \quad (7)$$

Численное решение ключевого уравнения фильтрации (3) с граничными условиями (4)–(6) выполнялось методом конечных разностей в его явной форме.

На рисунке 1 показано, как нелинейные фильтрационные эффекты, в частности предельный градиент давления q , сказываются на кривой восстановления давления (б) после изменения дебита добывающей скважины (а). Моделируется ситуация, когда эксплуатационная скважина с массовым расходом $M_0 = 0,5$ кг/с останавливается спустя $t_1 = 2$ сут за момент времени $t_* = 1$ час. Сплошные линии соответствуют классическому закону Дарси ($q = 0$), а пунктирные — значению $\gamma = 2$. Правая часть рисунка содержит увеличенный фрагмент левой части.

Рассмотрим, как меняется забойное давление после остановки скважины, основываясь на приведённый график. Видно, что с ростом параметра $t \geq t_1$ падение перепада давления $\Delta p_e(t)$ замедляется, что способствует постепенному восстановлению забойного давления $p_e(t)$. Весь процесс восстановления естественным образом распадается на две фазы. Первая фаза — резкий подъём давления, длящийся всего доли часа. Вторая — пологая асимптотика, растянутая на несколько суток. Следует отметить, если в пласте проявляются нелинейные фильтрационные эффекты, забойное давление приходит в равновесие гораздо медленнее, чем в случае, когда справедлив линейный закон Дарси.

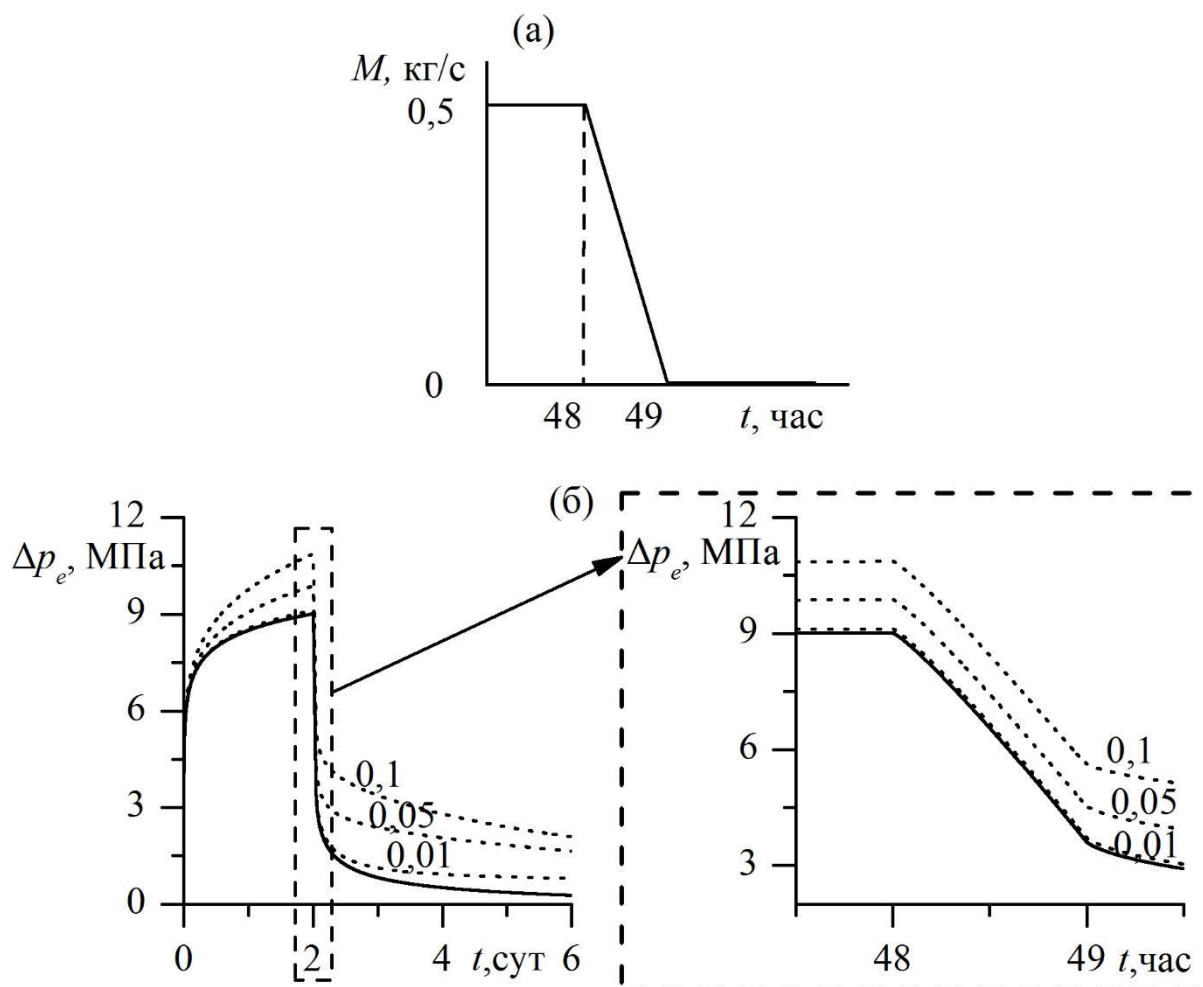


Рис. 1. Влияние значения предельного градиента давления q (б) на процесс восстановления давления.

Оценим, как ключевой параметр q — предельный градиент давления влияет на характер восстановления забойного давления. Цифры на кривых графика указывают величину q в МПа/м. Из графика видно, что чем выше q , тем более растянут процесс во времени. Количественная иллюстрация, показывает, что десятикратное увеличение порогового градиента давления q замедляет темп восстановления давления в 1,5 раза к моменту шести суток.

В результате выполненного исследования установлено, что фильтрационные процессы в низко- и сверхнизкопроницаемых коллекторах, подчиняющиеся нелинейным законам с пороговым градиентом давления, существенно изменяют динамику восстановления забойного давления после остановки добывающей скважины. Показано, что проявление нелинейных

эффектов приводит к более медленному выравниванию давления по сравнению с линейным законом Дарси.

Литература

1. Зайцев М.В., Михайлов Н.Н., Туманова Е.С. Модели нелинейной фильтрации и влияние параметров нелинейности на дебит скважин в низкопроницаемых коллекторах // Георесурсы. 2021. Т.23. №4. С.44-50
2. Шагапов В.Ш., Дударева О.В. Нелинейные эффекты фильтрации при переходных режимах работы скважины // Инженерно-физический журнал. 2016. Т.89. № 2. С. 285–291
3. Дударева О.В. Моделирование эволюции давления между возмущающей и прослушивающей скважинами в низкопроницаемых коллекторах. Инженерно-физический журнал. 2025. Том 98, №3. С.591-596.
4. Шагиев Р.Г. Исследование скважин по КВД. М.: Наука, 1998. 304 с.
5. Эрлагер Р. Гидродинамические исследования скважин. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 468 с.