

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

Куштанова Г.Г.

Казанский государственный университет

Численно исследуются нестационарные режимы фильтрации в трещиновато-пористых средах. В сравнении с экспериментальными данными анализируется характерный вид модельной кривой восстановления давления (КВД). При интерпретации КВД оценивается временной параметр, относящийся к блокам. Применяется метод динамики гидропроводности, позволяющий определять гидродинамические параметры неоднородных пластов.

В связи с вовлечением в разработку запасов, сосредоточенных в трещиновато-пористых коллекторах, возрастает значение всестороннего изучения фильтрации в рассматриваемых средах. С прикладной стороны особенно велика роль циклических процессов, как наиболее перспективных при разработке подобных коллекторов, оптимальность которых продолжает оставаться существенной проблемой.

Трещиновато-пористые коллекторы можно отнести к «неравномерной» по структуре строения среде, они состоят из пористых блоков, связанных между собой системой трещин. Объем пустот пористых блоков намного превышает объем трещин, поэтому жидкость, в основном, находится в блоках. Гидропроводность трещин значительно превышает гидропроводность блоков, в результате чего, фильтрация осуществляется главным образом по трещинам. Кроме того, предполагается, что в элементарном объеме достаточно полно представлены как поры, так и трещины, т.е. среда является двупоровой и в каждой точке представлены два давления, две проницаемости, две пористости.

В соответствии с моделью, предложенной Баренблаттом Г.И. с соавторами [1], трещиновато-пористый коллектор состоит из слабо сжимаемых пористых блоков, слабдеформируемых трещин, причем $k_1 \gg k_2$, а $m_2 \gg m_1$, всюду в тексте индекс 1 относится к трещинам, 2- к блокам. Скоростью фильтрации в блоках пренебрегают по сравнению со скоростью фильтрации в трещинах ($w_1 \gg w_2 \gg 0$), при этом фильтрация по трещинам подчиняется закону Дарси. Обмен

жидкостью между блоками и трещинами предполагается пропорциональным разности давления в блоках и трещинах.

В этом случае неустановившаяся плоско-радиальная фильтрация в трещиновато-пористой среде описывается системой уравнений [1,2]:

$$w_1 = -\frac{k_1}{\mu} \frac{\partial p_1}{\partial r}, \quad w_2 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\rho_0}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r w_1) + \frac{\partial}{\partial t}(m_1 \rho) - q = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}(m_2 \rho) + q = 0, \quad (2)$$

$$m_1 \rho = m_{10} \rho_0 + \rho_0 \beta_1 (p_1 - p_{10}),$$

$$m_2 \rho = m_{20} \rho_0 + \rho_0 \beta_2 (p_2 - p_{20}), \quad (3)$$

$$q = \alpha \frac{\rho_0 k_2}{\mu l^2} (p_2 - p_1) = \rho_0 A (p_2 - p_1) \quad (4)$$

где p - давление, w - скорость фильтрации, t - время, r - радиальная координата, m - пористость, ρ - плотность жидкости, k - проницаемость, μ - вязкость, b - упругоёмкость, q - массовый обмен жидкостью между блоками и трещинами, A - коэффициент этого обмена, $t_1 = b_1/A$, $t_2 = b_2/A$ - постоянные размерности времени, $k_i = k_i/m b_i$ коэффициент пьезопроводности трещин, учитывающий их упругоёмкость. Для простоты каждое элементарное количество жидкости в трещинах и блоках считается зависящим только от давления в них.

Нетрудно показать, что p_1 и p_2 удовлетворяют одному и тому же уравнению вида

$$\frac{\kappa_1 \tau_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(p_{1,2} + \tau_2 \frac{\partial p_{1,2}}{\partial t} \right) \right] = (\tau_1 + \tau_2) \frac{\partial p_{1,2}}{\partial t} + \tau_1 \tau_2 \frac{\partial^2 p_{1,2}}{\partial t^2} \quad (5)$$

Согласно принятой модели фильтрации только трещины имеют непосредственную гидродинамическую связь с границами области фильтрации, блоки такой связи не имеют. Это обстоятельство находит свое отражение в постановке граничных условий.

При пуске скважины в эксплуатацию с некоторым дебитом Q_0 на границе с пластом он задается в виде

$$\left(r \frac{\partial p_1}{\partial r}\right)_{r=r_c} = \frac{\mu Q_0}{2\pi k_1 h}, \quad (6)$$

и на контуре пласта – в виде отсутствия притока

$$\left(r \frac{\partial p_1}{\partial r}\right)_{r=R_k} = 0. \quad (7)$$

При остановке скважины после работы на границе $r=r_c$ реализуется в зависимости от ситуации одно из двух условий: полное прекращение притока или задание функции притока

$$\left(r \frac{\partial p_1}{\partial r}\right)_{r=r_c} = q(t). \quad (8)$$

Если ввести переменную $t' = t_1 t_2 / (t_1 + t_2)$, (в силу определения $t' < t_2$) уравнение (5) примет вид

$$\frac{\kappa'}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(p_{1,2} + \tau_2 \frac{\partial p_{1,2}}{\partial t} \right) \right] = \frac{\partial p_{1,2}}{\partial t} + \tau' \frac{\partial^2 p_{1,2}}{\partial t^2}, \quad (9)$$

где $k' = k_1 t_1 / (t_1 + t_2)$.

Математическое моделирование процесса проводилось на основе неявной разностной схемы.

Традиционно гидродинамические параметры пласта определяют по линейному участку кривой восстановления давления (КВД), построенной в координатах $\lg t, (p(t)-p(0))/Q_0$. В работе [3] было предложено определять гидропроводность по КВД в каждый момент времени. Полученную зависимость значения гидропроводности от времени предлагается именовать динамикой гидропроводности пласта, которая отражает распределение гидропроводности (а в случае однородной жидкости - проницаемость) по радиальной координате.

Типичный вид КВД по модели Баренблатта, который встречается в литературе – это кривая 1 рис. 1. На ней отмечается 2 линейных участка на больших и малых временах, соответственно. Экспериментальные кривые восстановления давления карбонатных коллекторов [4,5] имеют более протяженный начальный участок с очень малым изменением давления более похожим на кривую 2 указанного рисунка. В качестве примера приведем на

рис. 2 график КВД, скопированный из работы [5]. Линейный участок кривой начинается со времен более $\lg t=5$. Сопоставление графиков реальных кривых с результатами моделирования склоняет к заключению о малой упругоэластичности трещин. При возрастании упругоэластичности трещин под действием импульсного гидродинамического возмущения, например, пуска скважины, в первые моменты времени используется упругий запас трещин, что отражается в виде первого прямолинейного участка, если он присутствует. Снижение упругоэластичности трещин ведет его к сокращению. Математическая обработка этого участка позволяет определить гидродинамические параметры трещин. Подключение в работу пористых блоков отражается появлением следующего участка, расположенного между двумя прямыми, иногда его называют перегибом. Далее с момента времени t_2 блоки и трещины работают согласованно как в классический упругий коллектор, что проявляется в линейности последующего участка КВД. Пьезопроводность, определяемая по этому участку, включает в себя проницаемость трещин и суммарную упругоэластичность трещин и блоков. Отсюда же следует возможность оценки величины параметра t_2 по времени начала второго линейного участка.

Однако существует ряд факторов, которые могут замаскировать вид первоначального участка. К ним прежде всего следует отнести увеличенный приведенный радиус скважины, что вполне вероятно в трещиноватых средах, улучшенные характеристики призабойной зоны, неравновесность процесса фильтрации и послеприток. Для более детальных исследований крайне желательны специальные промысловые эксперименты с установкой, например, технических устройств, отсекающих послеприток.

Рассмотрим случай кусочно-постоянного значения гидропроводности по пласту. Пусть $s_1=2$ мкм² м/Па с – гидропроводность ближайшей к скважине области $r < 20$ м, а гидропроводность удаленной области – $s_2=10$ мкм² м/Па с при $r \geq 20$ м. КВД представлены на рис. 3, а соответствующие им графики гидропроводности на рис. 4.

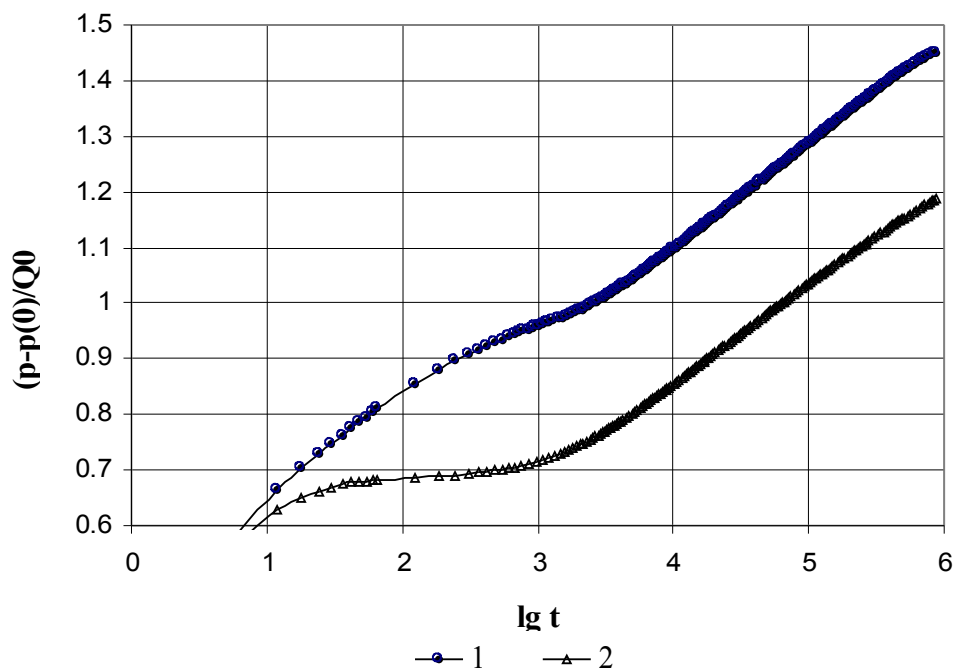


Рисунок 1. КВД трещиновато-пористого пласта

1 - $t_2=2000$ с, $t_1=200$ с; 2 - $t_2=2000$ с, $t_1=20$ с

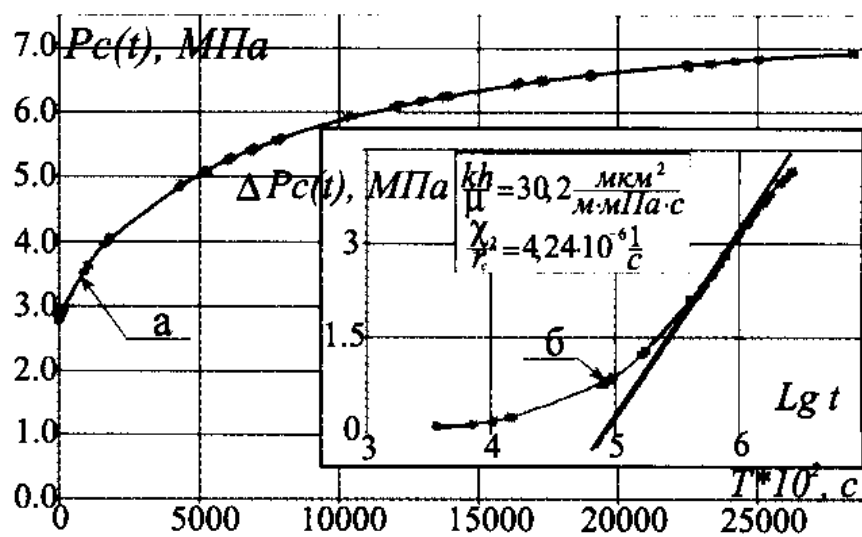


Рисунок 2. Кривая восстановления давления скв. 6596 (башкирский ярус) из работы [5]

Для сравнения на рис. 4 приведена кривая 4, полученная по модели классического упруго режима фильтрации в пористом пласте. На графике гидропроводности по модели классического упругого режима наблюдаются две относительно горизонтальные площадки соответствующие постоянным значениям гидропроводности. На кривых, рассчитанных по модели Баренблатта, эти площадки тоже присутствуют, но время их проявления и четкость зависят от значения времен релаксации и их соотношения. С увеличением t_2 (сравните кривые 1 и 3 рис. 4) время проявления значения гидропроводности дальней зоны увеличивается, информация о ней приходит позже. Сами КВД 1 и 3 различаются незначительно. Увеличение параметра t' , соответствующее увеличению упругоёмкости трещин, приводит к возможности более раннего определения параметров отдаленной зоны. Это же хорошо видно по самим КВД (кривые 1 и 2 рис. 3).

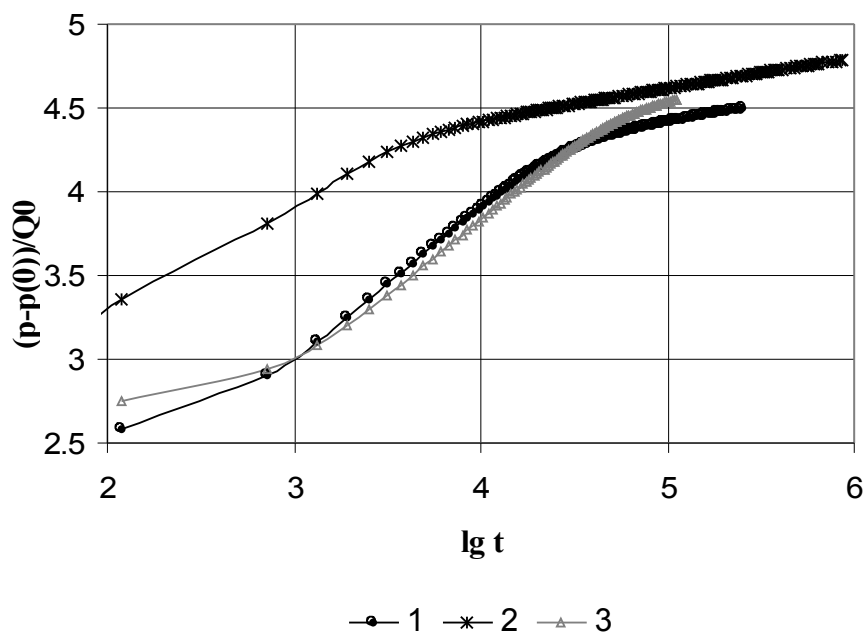


Рисунок 3. Кривые восстановления давления в пласте с ухудшенной призабойной зоной; кривые:

- 1 - $t_2=500$ с, $t'=10$ с;
- 2 - $t_2=500$ с, $t'=100$ с;
- 3 - $t_2=1000$ с, $t'=10$ с.

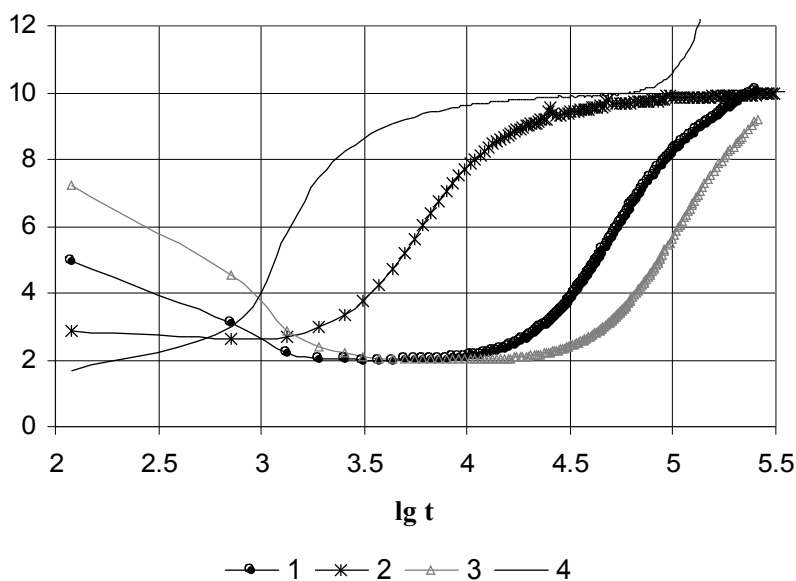


Рисунок 4. Динамика гидропроводности в пласте с ухудшенной призабойной зоной; кривые:

1 - $t_2=500$ с, $t'=10$ с; 2 - $t_2=500$ с, $t'=100$ с;
3 - $t_2=1000$ с, $t'=10$ с; 4 – модель классического упругого режима.

Поменяем параметры двух зон пласта так, что призабойная зона будет иметь улучшенные характеристики. Результаты представлены на рисунках 5 и 6. На КВД появился «затянутый» первоначальный участок и большая его величина при одном и том же параметре t' определяется величиной t_2 . Поскольку в данном случае имеется относительно небольшой участок улучшенной проницаемости, время прохождения его, видимо, сравнимо с временем релаксации t_2 , то информация о гидропроводности почти не отражается на графиках гидропроводности. Дополнительно рассчитан случай зоны улучшенной гидропроводности смещенный от скважины так, что она превращается в кольцевую зону. Кривая 4 соответствует случаю наличия кольцевой зоны повышенной гидропроводности в интервале от 10 до 30 м в пласте с гидропроводностью 10 мкм²/Па с, которая на ней четко выделяется. Таким образом, кривые 1 и 4 отражают ситуацию зон с одними и теми же параметрами, но расположенных на разном расстоянии от скважины и четкость проявления их параметров на графике динамики гидропроводности различается. Это дает основания предполагать, что причина кроется в проявлении релаксации, а не в свойствах указанного участка.

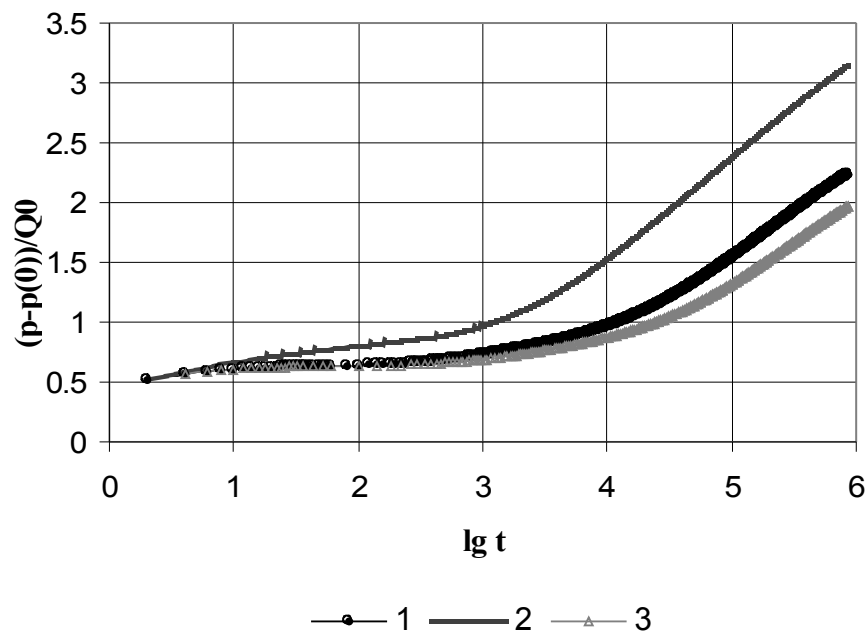


Рисунок 5. Кривые восстановления давления в пласте с улучшенной призабойной зоной ; кривые:
 1 - $t_2=500$ с, $t'=10$ с; 2 - $t_2=500$ с, $t'=100$ с; 3 - $t_2=1000$ с, $t'=10$ с.

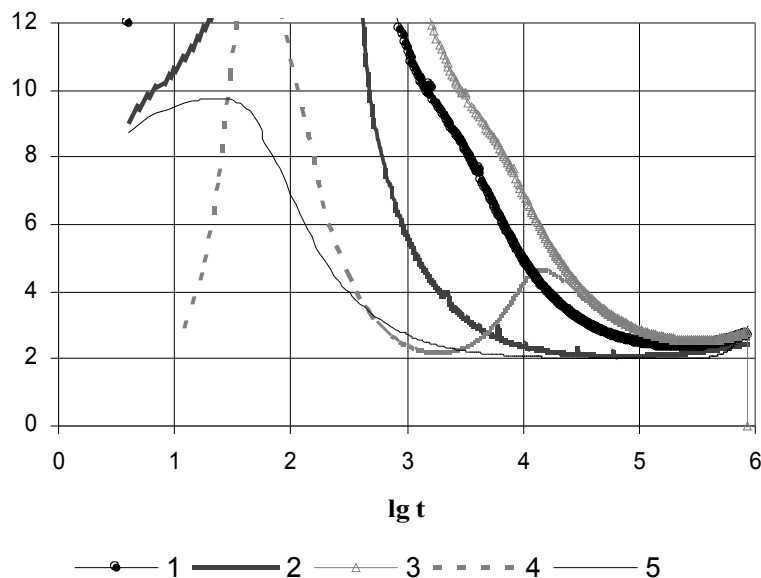


Рисунок 6. Динамика гидропроводности в пласте с улучшенной призабойной зоной; кривые:
 1 - $t_2=500$ с, $t'=10$ с; 2 - $t_2=500$ с, $t'=100$ с; 3 - $t_2=1000$ с, $t'=10$ с;
 4 – кольцевая зона повышенной гидропроводности $t_2=500$ с, $t'=10$ с;
 5- модель классического упругого режима.

Проведенное моделирование в сопоставлении с реальными КВД дает основание полагать, что упругоэластичность трещин много меньше упругоэластичности блоков, что определяет соотношение временных параметров для описания фильтрации в трещиновато-пористых средах. Тестирование метода динамики гидропроводности на моделях свидетельствует о перспективности его применения в частности для выявления неоднородностей пластов.

Литература

1. Баренблатт Г.И., Желтов Ю.П., Кочина И.Н. Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // ПММ.-1960.-Т.24, вып.5.-С.852-864.
2. Молокович Ю.М., Марков А.И., Давлетшин А.А. Куштанова Г.Г. Пьезометрия окрестности скважин. Теоретические основы.-Казань: изд-во «ДАС», 2000.-203с.
3. Овчинников М.Н. Гидропроводность в методе кривых восстановления давления как динамический параметр // Изв. вузов. Нефть и газ. 2004, №6. с.41-45.
4. Молокович Ю.М., Марков А.И., Сулейманов Э.И., Фархуллин Р.Г., Куштанова Г.Г, Давлетшин А.А., Хисамов Р.С., Смыков В.В., Никашев О.А. «Выработка трещиновато-пористого коллектора нестационарным дренированием». Казань: изд-во «Регентъ», 2000-156 с.
5. Фархуллин Р.Г., Ханнанов М.Т. Некоторые особенности гидромеханики нефтяных коллекторов с двойной пористостью при дренировании // Георесурсы. - 2006.-№2.-С.37-39.