

**Новый подход к интерпретации
результатов экспериментов по
определению начального градиента
давления, проведенных на
низкопроницаемом керне**

**A new approach to the interpretation
of experiments on low-permeability
core to determine the initial pressure
gradient**

Е.С. Туманова¹

E.S. Tumanova¹

¹Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»
«ПермНИПИнефть» в г. Пермь

¹PermNIPIneft Branch of LUKOIL-
Engineering LLC in Perm, Perm

Адрес для связи: katya_timoxina@mail.ru

E-mail: katya_timoxina@mail.ru

Ключевые слова: низкопроницаемый коллектор, лабораторные эксперименты, нелинейная фильтрация, начальный градиент давления

Keywords: low-permeability reservoir, laboratory experiments, nonlinear filtration, initial pressure gradient

В последние годы в активную разработку вводится все больше месторождений с низкопроницаемыми коллекторами. Известно, что разработка залежей нефти в низкопроницаемых коллекторах характеризуется проявлением аномальных свойств пластовых систем. При малых перепадах пластового давления на единицу длины наблюдается отклонение от закона линейной фильтрации (от закона Дарси). Наглядным подтверждением этому служат результаты лабораторных исследований [1,2]. Установлено, что фильтрация жидкости начинается после создания определенного начального перепада (градиента) давлений между входным и выходным сечениями образцов керна. Начальный градиент пластового давления является важным технологическим параметром, необходимым для оценки добычных возможностей низкопроницаемых коллекторов.

In recent years, more and more fields with low-permeability reservoirs have been actively developed. It is known that the development of oil deposits in low-permeable reservoirs is characterized by the manifestation of abnormal properties of reservoir systems. At small differences in reservoir pressure per unit length, there is a deviation from the law of linear filtration (Darcy's law). It is established that liquid filtration begins after creating a certain initial pressure drop (gradient) between the input and output cross sections of the core samples. The initial reservoir pressure gradient is an important technological parameter necessary for evaluating the production capacity of low-permeability reservoirs.

Зависимость скорости фильтрации нефти от градиента давления в низкопроницаемых коллекторах аналогична соответствующей зависимости при фильтрации высоковязкой (вязкопластичной) жидкости (рис. 1). Закон фильтрации с начальным градиентом давления H_0 (см. рис. 1, линии 2 и 3) высоковязкой нефти и закон фильтрации в низкопроницаемых коллекторах описываются одним выражением

$$|v_f| = \frac{k}{\mu} (|\text{grad} p| - H_0), \quad (1)$$

где k – проницаемость коллектора; μ – вязкость нефти.

Формула (1) представляет собой определенную идеализацию фактической фильтрации нефти, применяется в теоретических исследованиях и

гидродинамических расчетах для оценки влияния эффектов нелинейной фильтрации на показатели разработки месторождений. Начальный градиент пластового давления определяется по данным лабораторных исследований следующим образом [1]:

1) для каждого образца керна строится зависимость скорости фильтрации $v_{\phi} = q_{\text{ж}}/F$ ($q_{\text{ж}}$ – дебит жидкости, F – площадь поперечного сечения керна) от градиента давления $\text{grad} p = \Delta p/L$ (Δp – перепад давления между входным и выходным сечениями керна, L – длина образца керна);

2) выделяется линейная часть кривой фильтрации, которая описывается уравнением (1);

3) для линейной части определяется эффективная подвижность флюида $tg\phi = k/m$, умножением подвижности на вязкость рассчитывается эффективная фазовая проницаемость;

4) начальный градиент давления H_0 находится путем экстраполяции линейной части кривой фильтрации до пересечения с осью абсцисс.

В рассмотренном способе интерпретации данных лабораторных исследований [1] для оценки начального градиента давления используется лишь по одной точке для каждого образца керна. Остальные результаты измерений являются вспомогательными. Вместе с тем промежуточные точки также содержат полезную информацию.

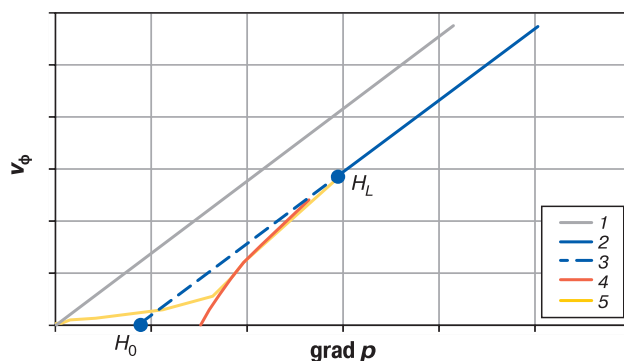


Рис. 1. Зависимости скорости фильтрации v_{ϕ} от градиента давления $\text{grad} p$ по закону Дарси (1), с начальным градиентом давления H_0 (2), при экстраполяции линейной части кривой 2 (H_L – предельный градиент давления, разделяет области линейной и нелинейной фильтрации) (3) и варианты, отражающие реальную форму кривых при приближении к нулевой скорости (4, 5)

Для получения дополнительных данных применен известный подход для описания строения поровой среды. Модель коллектора – образец керна – представляется в виде «штабеля» микрокапилляров одинаковой длины, но различной проницаемости, изолированных друг от друга. Согласно формулам Дарси – Пуазейля проницаемость i -го капилляра в такой модели прямо пропорциональна квадрату его площади в поперечном сечении

$$q_{\text{ж}i} = \frac{\pi R_i^4 \Delta p}{8 \mu L} = \frac{S_i^2 \Delta p}{8 \pi \mu L} = \frac{k_i F \Delta p}{\mu L}, \quad (2)$$

где R – радиус капилляра; S – площадь сечения капилляра.

Проницаемость всего образца керна равна сумме проницаемостей входящих в него капилляров, т.е.

$$q_{\text{ж}} = \frac{\Delta p k}{\mu L} = \frac{F \Delta p}{\mu L} = \frac{F \Delta p}{\mu L} \sum_n^1 k_i. \quad (3)$$

По аналогии с моделью фильтрации высоковязкой (вязкопластичной) жидкости [2] предполагается, что каждый капилляр имеет свой начальный градиент давления.

Свойства жидкости, находящейся вблизи твердой поверхности, отличаются от ее свойств в объеме, что обусловлено влиянием электрических, химических, капиллярных и других процессов. В работе [3] отмечено, что вязкость изменяется в зависимости от расстояния до твердой стенки. Микрокапилляры, в которых указанные процессы играют существенную роль, в поперечном сечении имеют размеры, соизмеримые с толщиной граничных с твердой поверхностью слоев. При снижении градиента давления происходит коагуляция капилляров. Объем керна, в котором жидкость движется, постепенно уменьшается, соответственно снижается проницаемость керна. В данном случае начальную проницаемость для жидкости каждого образца керна k_0 в каждый момент времени можно записать в виде суммы проницаемостей

$$k_0 = k_{\text{ф}} + k_{\text{нп}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{ф}} = \sum_{n_{\text{ф}}}^1 k_{\text{ф}i}$ – сумма проницаемостей капилляров $k_{\text{ф}i}$, в которых жидкость

фильтруется; $k_{\text{нп}} = \sum_n^{n_{\text{ф}}+1} k_{\text{нп}i}$ – сумма проницаемостей капилляров $n-n_{\text{ф}}+1$, в которых жидкость неподвижна.

На керне месторождения им. В.Н. Виноградова были проведены лабораторные фильтрационные исследования течения пластовой нефти при начальной водонасыщенности и воды при 100%-ной водонасыщенности, которые подтвердили отклонение скорости течения от линейного закона Дарси. В работе [4] показано, что связь между начальным градиентом давления и проницаемостью коллектора хорошо описывается степенной функцией. Такая же форма зависимости использована в данной работе между $k_{\text{нп}}$ и текущими градиентами давления при дополнительной обработке результатов экспериментов

$$|\text{grad} p| = \frac{A}{k_{\text{нп}}^u}, \quad (5)$$

где A , u – коэффициенты эмпирической зависимости.

С учетом выражений (3), (5) уравнение скорости фильтрации может быть представлено в виде

$$|v_\phi| = \frac{k_0}{\mu} |\text{grad} p| - \frac{A^{\frac{1}{u}}}{\mu (|\text{grad} p|)^{\frac{1-u}{u}}} \quad (6)$$

В выражении (6) k_0 , A , u – неизвестные параметры, для их нахождения оно преобразовано в линейное уравнение

$$\frac{\mu |v_\phi|}{|\text{grad} p|} = k_0 - \frac{A^{\frac{1}{u}}}{|\text{grad} p|^{\frac{1}{u}}} \quad (7)$$

На рис. 2 приведен пример построения линейной зависимости между комплексными переменными для одного из образцов керна. Зависимости

построены для фильтрации нефти и воды. Аргумент представлен как $x = \frac{1}{|\text{grad} p|^{\frac{1}{u}}}$,

функция $y = \frac{\mu |v_\phi|}{|\text{grad} p|}$. Параметры подбирались таким образом, чтобы получились линейные уравнение с максимальными значениями коэффициента корреляции R^2 .

По коэффициентам полученных линейных уравнений определялись параметры k_0 и A ; k_0 соответствует величине, к которой приближается проницаемость керна при высоких градиентах давления.

После обработки результатов исследований всей коллекции образцов керна между параметрами A и u установлена тесная эмпирическая связь, которая в линейной форме имеет вид

$$\ln A = \ln B - uC, \quad (8)$$

а в степенной форме

$$A = BC^{-u}, \quad (9)$$

где B , C – коэффициенты эмпирических зависимостей.

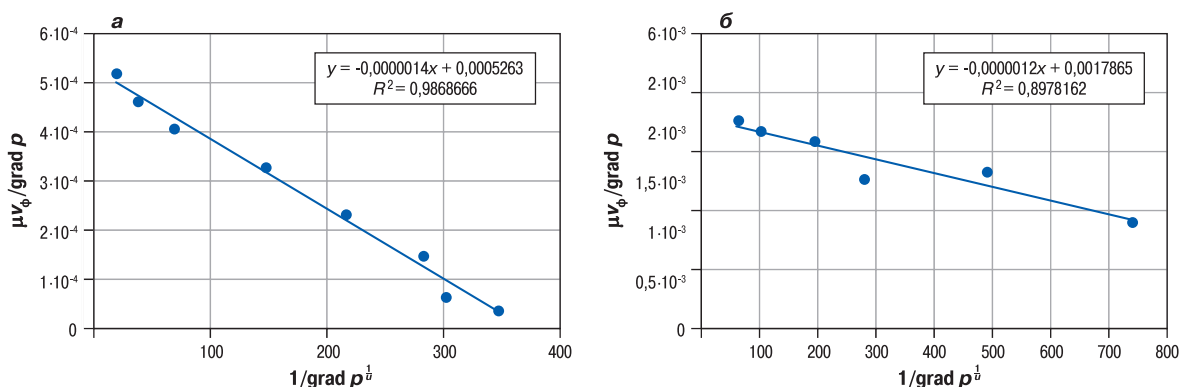


Рис. 2. Пример построения линейной зависимости между комплексными переменными x и y при фильтрации нефти при начальной водонасыщенности (а) и фильтрации воды при 100%-ной водонасыщенности (б)

На рис. 3 приведена линейная зависимость между параметрами A и u . Аргументом здесь является $x = u$, функцией $y = \ln A$.

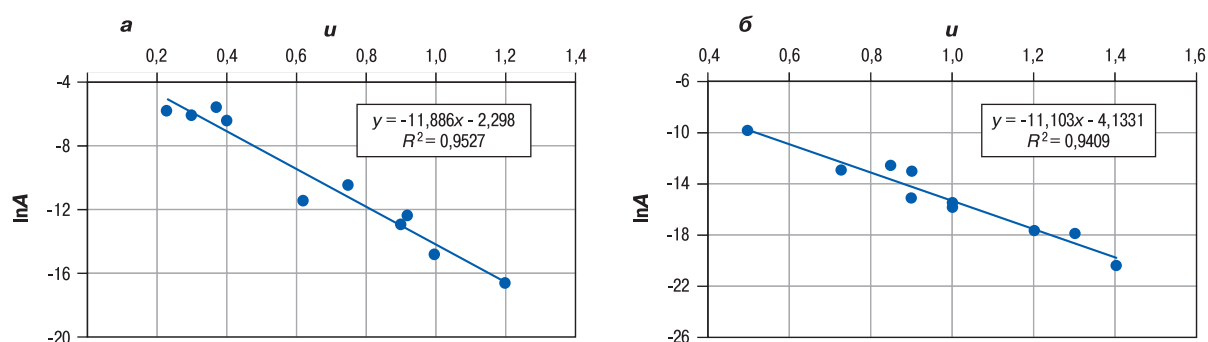


Рис. 3. Зависимость между параметрами A и u при фильтрации нефти (а) и воды (б)

Уравнение фильтрации жидкости (6) после подстановки выражения (9) приобретает более универсальный вид

$$|v_{\phi}| = \frac{k_0}{\mu} |\text{grad} p| - \frac{B^u}{C_{\mu} (|\text{grad} p|)^u} \quad (10)$$

В уравнении (6) содержатся три индивидуальных параметра для каждого образца керна (k_0 , A , u), в уравнении (10) их число сократилось до двух (k_0 , u).

Уравнение (10) отражает фактическую зависимость скорости фильтрации подобно линии 4 на рис. 1 в интервале до предельного значения H_L . В данном интервале градиентов давления линии 3 и 4 приближаются друг к другу и сливаются в одной точке при $\text{grad} p = H_L$. Из данной точки линейное уравнение с начальным градиентом давления H_0 (см. рис. 1, линия 2) получается при $u = 1$. Сравнивая уравнения (1) и (10), легко заметить, что при $u = 1$ начальный градиент давления

$$H_0 = \frac{B}{Ck_0}. \quad (11)$$

Уравнение (1) с учетом выражения (11) принимает следующий вид:

$$|v_\phi| = \frac{k_0}{\mu} \left(|\text{grad} p| - \frac{B}{Ck_0} \right). \quad (12)$$

В таблице приведены результаты интерпретации данных лабораторных исследований образцов керна при фильтрации нефти и воды. При фильтрации нефти с начальной водонасыщенностью начальные градиенты давления значительно выше чем при фильтрации воды в образцах со 100%-й водонасыщенностью. Экспериментальные данные явились основанием для апробации их при гидродинамическом моделировании пласта АСЗ. Для изучения влияния нелинейных процессов на технологические показатели разработки из общей гидродинамической модели (ГДМ) пласта был выделен сектор. Расчеты проводились в симуляторе TEMPEST MORE. Для моделирования нелинейной фильтрации в ГДМ использовалась опция OVRG, которая позволяет учитывать нелинейные эффекты.

Номер образца	Проницаемость для нефти, мкм	Начальный градиент давления H_0 , МПа/м	Проницаемость для воды, мкм ²	Начальный градиент давления H_0 , МПа/м
	при фильтрации нефти и начальной водонасыщенности		при фильтрации воды и 100%-й водонасыщенности	
1	0,00034	0,021	0,00414	0,0002
2	0,00053	0,013	0,00212	0,0005
3	0,00098	0,007	0,00128	0,001
5	0,00016	0,042	0,00066	0,002
6	0,00004	0,165	0,00011	0,009
7	0,00005	0,127	0,00031	0,003
8	0,00002	0,296	0,00005	0,022
9	0,000005	1,386	0,00001	0,084
10	0,00001	0,572	0,00002	0,047

Первым этапом расчетов на секторной модели являлась адаптация полученных результатов к данным фактической эксплуатации добывающих скважин с учетом и без учета нелинейной фильтрации. Настройка на историю разработки осуществлялась на режиме фактического дебита жидкости. При низкой обводненности скважин опытного участка и отсутствии фактических замеров пластового давления основным параметром настройки являлась динамика забойного давления по скважинам, замеряемого с помощью датчиков ТМС, размещенных на приеме насоса.

На рис. 4 приведены фактическая и расчетная динамика забойного давления по двум вариантам: в условиях линейной и нелинейной фильтрации. Из него видно, что если не учитывать нелинейные процессы в ГДМ, то по мере снижения фактического дебита жидкости забойное давление возрастает (см. рис. 4, синяя кривая). Это происходит из-за неограниченности зоны дренирования скважины. Учет в ГДМ экспериментальных зависимостей позволяет «запирать» область фильтрации в районе скважины, т.е. создавать ограниченную область дренирования, что характерно для сверхнизкопроницаемых коллекторов. В результате в районе скважины уменьшается расчетное пластовое давление, и полученная динамика забойного давления хорошо согласуется с фактической за весь период эксплуатации (см. рис. 4, красная кривая). Кроме того, учет нелинейной фильтрации в ГДМ позволяет снизить число итераций в процессе адаптации к истории разработки пласта.

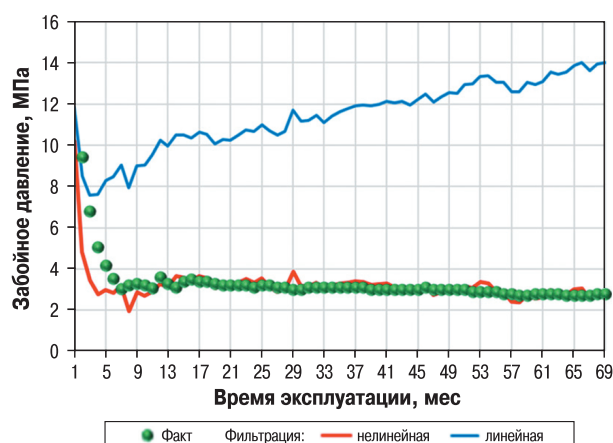


Рис. 4. Адаптация динамики забойного давления без учета и с учетом нелинейной фильтрации

Выводы

1. В качестве дополнения к существующей методике предлагается способ интерпретации данных лабораторных исследований низкопроницаемого керна по определению начального градиента давления.

2. Новый подход к обработке лабораторных данных путем линеаризации нелинейной части уравнения фильтрации позволяет использовать все точки исследования по каждому образцу керна.

3. Сравнение градиентов давления, полученных с помощью линеаризации и экстраполяции линейной части фильтрационной зависимости, показывает их хорошую сходимость.

Список литературы

1. *Нелинейная* фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Анализ и интерпретация результатов лабораторных исследований керна Приобского месторождения. В.А. Байков, Р.Р. Галеев, А.В. Колонских [и др.] // Вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2013. – № 2. – С. 8–12.
2. *Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М.* Подземная гидромеханика. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
3. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д.* Вода в дисперсных системах. – М.: Химия, 1989. – 288 с.
4. *Туманова Е.С.* Обоснование параметров нелинейной фильтрации в гидродинамической модели нефтяной залежи с низкопроницаемым коллектором // Нефтепромысловое дело. – 2020. – № 5. – С. 20–25.