

## Аналитическое определение критических градиентов фильтрации для низкопроницаемых коллекторов как альтернатива экспериментальным исследованиям керна

О.Н. Шевченко<sup>1</sup>, М.В. Топилин<sup>1</sup>, Д.Ю. Бунин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ВолгоградНИПИморнефть»  
в г. Волгограде

**Адрес для связи:** Oxana.Shevchenko@lukoil.com

**Ключевые слова:** низкопроницаемый коллектор, трудноизвлекаемые запасы, наклонно направленные скважины, горизонтальные скважины, гидроразрыв пласта (ГРП), нелинейная фильтрация

В последнее время во всем мире наблюдается тенденция к ухудшению структуры запасов углеводородного сырья. Растет число месторождений с трудноизвлекаемыми запасами, наибольшую часть которых составляют залежи в низкопроницаемых коллекторах. Гидродинамическое моделирование подобных коллекторов вызывает определенные трудности. Затруднительно корректно адаптировать модель к истории разработки вследствие того, что для низкопроницаемых объектов характерен нелинейный характер фильтрации, а все гидродинамические симуляторы базируются на линейном законе фильтрации. Поэтому очень часто используется метод подбора параметров гидродинамической модели.

В статье рассмотрено построение гидродинамической модели в симуляторе Tempest, в котором реализована возможность моделирования нелинейной фильтрации в условиях высоковязкой нефти. Для этого использованы «запирающий градиент фильтрации» и «множитель на поток». Первый – ограничивает зону дренирования скважины, второй –кратно уменьшает скорость фильтрации флюида. Показана возможность использования данного метода адаптации модели для месторождений с низкопроницаемыми коллекторами. Предложена аналитическая модель, позволяющая определить предельные градиенты фильтрации для условий низкопроницаемого коллектора. Для апробации метода использована гидродинамическая модель месторождения им. В.Н. Виноградова.

## Analytical determination of critical filtration gradients for low-permeability reservoirs as an alternative to experimental core studies

O.N. Shevchenko<sup>1</sup>, M.V. Tropilin<sup>1</sup>, D.Yu. Bunin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>VolgogradNIPImorneft Branch of LUKOIL-Engineering LLC in Volgograd,  
RF, Volgograd

**E-mail:** Oxana.Shevchenko@lukoil.com

**Keywords:** low-permeability reservoirs, hard-to-recover reserves, directional wells, lateral wells, hydraulic fracturing, nonlinear filtration

All over the world there is a tendency to reserves deterioration of hydrocarbon fuels. The share of fields with hard-to-recover reserves is growing, the largest part of which are low-permeable reservoirs. In addition to problems with the development of this type of collectors, there is a difficulty in building of hydrodynamic model of the field. All hydrodynamic simulators are based on the linear law of Darcy flow, so it is difficult to correctly adapt this model to the history of development, because this kind of objects observed nonlinear filtration. The construction of the hydrodynamic model is carried out in the simulator. Therefore, to adapt the model, it is necessary to select the parameters of the filtration medium, which are often far from the real studies of collectors. Tempest MORE of ROXAR, in which there is a possibility of modeling nonlinear filtration for high-viscosity oil with using «locking a gradient filter and a multiplier on the flow». The first one limits the well drainage area; the second reduces the fluid filtration rate multiple times. In the presented paper the possibility of using this method of adaptation of the model for low permeability reservoirs is described. Analytical methods for determining these critical pressure gradients are presented. Critical pressure gradients were analytically determined by using analytical methods on the example of the V.N. Vinogradov oil field with low-permeability reservoir.

Фильтрация флюида в низкопроницаемых коллекторах с абсолютной газопроницаемостью менее  $2 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> существенно затруднена ввиду нарушения линейного закона фильтрации Дарси и характеризуется наличием предельных градиентов давления.

В работах [1–5] дано описание серии экспериментов, в которых исследовались особенности нелинейной фильтрации. В результате экспериментов были сделаны следующие выводы:

- фильтрация в низкопроницаемых коллекторах при низких градиентах давления характеризуется отклонением от линейного закона фильтрации Дарси;
- с уменьшением проницаемости коллектора отклонения закона фильтрации от линейного становится более выраженным;
- отклонение от линейного закона фильтрации в низкопроницаемых коллекторах характеризуется наличием эффективных начального и предельного градиентов давления;
- при фильтрации воды с остаточной нефтью и нефти с остаточной водой эффекты нелинейной фильтрации более выражены, чем при фильтрации воды в образцах со 100%-ной водонасыщенностью, причем значения эффективных

градиентов на порядок выше; при абсолютных проницаемостях более  $10 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> нелинейными эффектами можно пренебречь;

– результаты экспериментов по многофазной фильтрации показали существенное влияние насыщенности флюидом на характеристики нелинейной фильтрации, причем степень нелинейности сначала возрастает с увеличением количества воды в потоке, а затем уменьшается, т.е. наблюдается точка инверсии.

Следовательно, использование линейного закона фильтрации Дарси в процессе создания гидродинамической модели приводит к формированию оптимистичных прогнозов и нерациональной системы разработки залежи, недостижению утвержденного коэффициента извлечения нефти.

По результатам лабораторных исследований [1], проведенных на образцах низкопроницаемых коллекторов (проницаемость для газа –  $1 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>), получена зависимость скорости фильтрации от градиента давления (рис. 1).

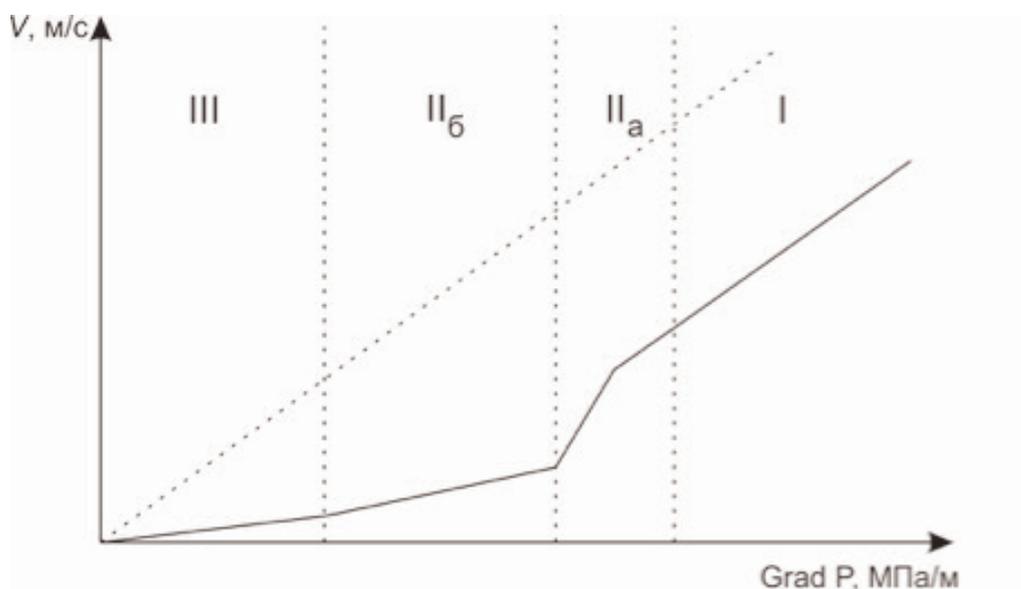


Рис. 1. Зависимость скорости фильтрации  $v$  от градиента давления  $\text{grad } p$  [1]

На зависимости, представленной на рис. 1, выделены следующие зоны [1].

I – зона характеризуется фильтрацией, происходящей по закону, аналогичному закону для фильтрации неньютоновской жидкости с начальным градиентом давления

$$\bar{v} = \frac{k}{\mu} \left( 1 - \frac{H}{|\text{grad} p|} \right) \text{grad} p \text{ при } |\text{grad} p| \geq H, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость фильтрации, м/с;  $k$  – эффективная проницаемость линейной части, м<sup>2</sup>;  $\mu$  – вязкость, Па·с;  $\text{grad} p$  – градиент давления, Па/м;  $|\text{grad} p|$  – функция, характеризующая изменение тангенса угла наклона кривой фильтрации.

IIa и IIб – зоны стационарного притока, в которых фильтрация описывается степенным законом А.А. Краснопольского

$$v^2 = \alpha |\text{grad}p|, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – материальная константа пористой среды, определяемая в результате обработки экспериментальных данных;  $|\text{grad}p|$  – модуль вектора градиента фильтрационного давления.

Эти зоны показывают изменчивость скорости фильтрации за счет характерных переходов.

III – зона соответствующая условно линейному закону фильтрации Дарси

$$v = \alpha |\text{grad}p|. \quad (3)$$

Эта зона характеризуется низкими градиентами давления, проходит через начало координат.

На практике, в низкопроницаемых коллекторах, линейная фильтрация недостижима, так как требует создания высоких градиентов давления. В такого рода коллекторах приток флюида подчиняется степенному закону фильтрации, что графически наблюдается в зонах IIa и IIб.

### **Изучение нелинейной фильтрации на водо- и нефтенасыщенном керне**

Для проведения фильтрационных исследований использованы натуральные образцы керна месторождения имени В.Н. Виноградова. Из коллекции кернов после подготовки и определения фильтрационно-емкостных свойств были отобраны девять образцов (табл. 1).

**Таблица 1. Параметры образцов**

Номер образца	$K_{п}, \%$	$k_{пр}, 10^{-3} \text{ мкм}^2$	
		для газа	для воды
1	19,95	2,2	0,60
2	22,52	6,3	2,20
3	22,93	10,3	4,27
4	21,24	3,8	0,13
5	16,59	0,8	0,01
6	17,47	2,0	0,12
7	16,23	4,6	0,02
8	17,38	0,9	0,05
9	16,17	0,7	0,02

**Примечание.**  $K_{п}, k_{пр}$  – коэффициент соответственно пористости и проницаемости.

В основные задачи входило определение градиентов давлений при снижении объемных расходов жидкости до предельно возможных значений, при которых технические возможности лабораторного оборудования позволяли фиксировать перепады давлений и обеспечивать стабильную подачу флюида в образец. На каждом расходе фильтрация продолжалась до достижения постоянного перепада давления. Коэффициент проницаемости  $k_{пр}$  рассчитывался на основе программных расчетов (при известной вязкости флюида и размерах модели пласта). Эксперименты проводились на установке исследования керна при пластовых условиях.

Градиенты давлений при различных проницаемостях изучались в диапазоне расходов от максимального  $0,02 \text{ см}^3/\text{мин}$ , позволяющего определять начальные значения для линейного участка фильтрации, до  $0,00005 \text{ см}^3/\text{мин}$  для выделения зоны начала нелинейных процессов.

В процессе исследований моделировались пластовые давление и температура. Исследовались единичные образцы керна диаметром 30 мм, подготовленные в соответствии со стандартными методиками. В опытах использовались рекомбинированная модель пластовой нефти и пластовая вода месторождения им. В.Н. Виноградова. Неньютоновских свойств жидкостей не обнаружено. Фильтрационные исследования на каждой модели пористой среды были разделены на два этапа: 1) однофазная фильтрация воды на водонасыщенном керне; 2) однофазная фильтрация нефти на керне с остаточной водонасыщенностью.

Для численной оценки степени различия предложено использовать следующие характерные параметры (точки) (рис. 2).

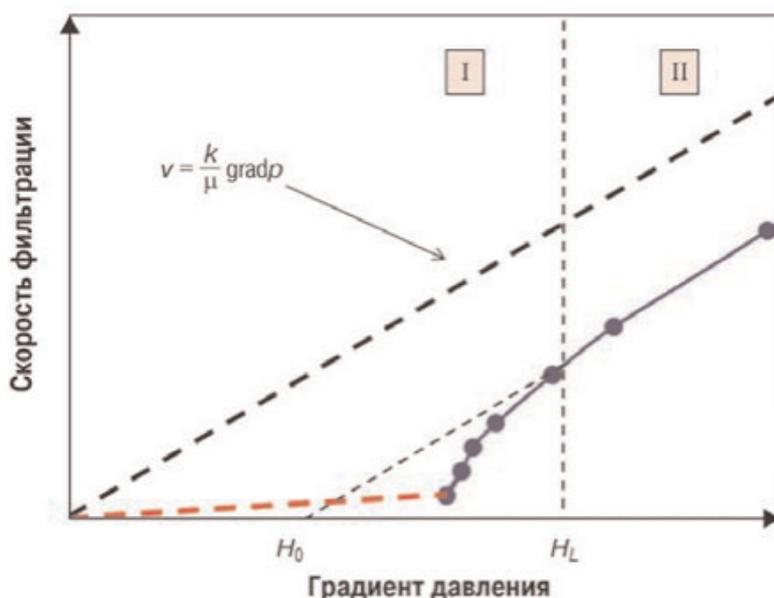


Рис. 2. Зависимость скорости фильтрации от градиента давления

1. Эффективный начальный градиент давления  $H_0$  – точка, полученная в результате экстраполяции линейной части кривой фильтрации до пересечения с осью абсцисс (градиентов давления). Неоднократные лабораторные эксперименты, проведенные в рабочей области экспериментальной установки, подтверждают существование данной точки.

2. Эффективный предельный градиент давления  $H_L$  – выше этой точки тангенс угла наклона кривой фильтрации остается постоянным. Эта точка зафиксирована практически во всех проведенных экспериментах, однако скорости, при которых указанный эффект обнаружен, в большей части экспериментов находятся на грани технических возможностей экспериментальной установки.

Для определения начального градиента давления фильтрации пластовых флюидов (воды и нефти) на зависимости линейной скорости фильтрации от градиента давления каждого образца и соответствующего флюида выделялись участки отклонения от линейного закона Дарси. На этих участках строились касательные с экстраполяцией на ось абсцисс (градиентов давления) для получения значения  $H_0$  (табл. 2).

**Таблица 2. Результаты определения эффективного начального градиента давления при фильтрации воды и нефти**

Номер образца	Проницаемость, $10^{-3}$ мкм <sup>2</sup> , для		ОФП	$H_0$ , МПа/м	$H_L$ , МПа/м
	газа	воды			
3	10,3	4,27 / 0,317	0,41 / 0,03	0,0008 / 0,0923	0,0067 / 0,2916
2	6,3	2,19 / 0,535	0,35 / 0,08	0,0001 / 0,032	0,0104 / 0,069738
7	4,6	0,021 / 0,007	0,0046 / 0,002	0,0396 / 2,702	0,135 / 0,020288
4	3,8	1,25 / 0,9	0,33 / 0,24	0,0048 / 0,0032	0,0076 / 0,7779
1	2,2	0,595 / 0,166	0,27 / 0,08	0,0201 / 0,0014	0,0311 / 0,7826
6	2	0,12 / 0,043	0,06 / 0,02	0,053 / 0,5666	0,09008 / 0,7859
8	0,9	0,048 / 0,0238	0,05 / 0,03	0,0739 / 0,321	0,2286 / 0,4533
5	0,8	0,012 / 0,004	0,02 / 0,01	0,1146 / 2,266	0,1655 / 2,725
9	0,7	0,022 / 0,0117	0,03 / 0,02	0,1455 / 0,6914	0,473055 / 0,2916

**Примечания.** 1. ОФП – относительная фазовая проницаемость (линейная часть).  
2. В числителе приведены значения, полученный при фильтрации воды в образцах со 100%-ной водонасыщенностью, в знаменателе – при фильтрации нефти при остаточной водонасыщенности.

На водонасыщенных образцах отклонение фильтрации воды от линейного закона наблюдалось при скоростях менее 0,01 м/сут при соответствующих средних градиентах давлений 0,05–0,5 МПа/м; на нефтенасыщенных в процессе фильтрации газонасыщенной нефти – при скоростях и градиентах давлений, в 10 раз превышающих аналогичные показатели для воды, соответственно 0,1–0,2 м/сут и 0,5–0,6 МПа/м.

Полученные путем графической экстраполяции эффективные начальные градиенты давлений при фильтрации воды и нефти показывают, что в зонах пласта с абсолютной проницаемостью более  $7-8 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> течения жидкостей подчиняются линейным законам фильтрации. В зонах низких проницаемостей наблюдаются ярко выраженные нелинейные эффекты.

Наряду с проведением экспериментальных исследований выполнена серия аналитических расчетов для определения критических градиентов фильтрации.

В работе [1] приведены результаты экспериментов, демонстрирующие наличие ограниченной зоны дренирования как в районе скважины, так и в районе трещины многостадийного гидроразрыва пласта. Поэтому для повышения качества и достоверности прогноза в гидродинамической модели месторождения имени В.Н. Виноградова была учтена функция нелинейной фильтрации. В Tempest MORE это осуществлялось с помощью опции OVPG («запирающего» градиента давления) (рис. 3). Данная опция включает три параметра: множитель на поток нефти  $F_0$ , начальный градиент давления  $GP_0$  и предельный градиент давления  $GP_1$ . Подвижность нефти  $F_0$  увеличивается при достижении начального градиента  $GP_0$  и достигает максимума при предельном  $GP_1$ .

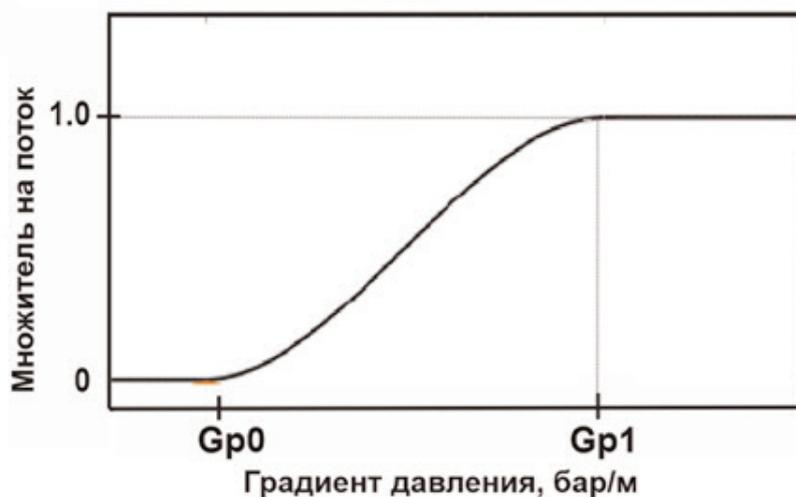


Рис. 3. Функция OVPG

В работе [6] предложено уравнение для определения начального градиента давления, учитывающее константу Гамакера, межмолекулярное состояние жидкости, проницаемость среды,

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{0,0018As(1-m)^2}{\alpha\rho gk}, \quad (4)$$

где  $A$  – константа Гамакера, Дж;  $s$  – удельная поверхность частиц;  $m$  – пористость среды;  $\alpha$  – межмолекулярные расстояния в жидкости, м;  $\rho$  – плотность фильтрующего флюида, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – проницаемость среды, м<sup>2</sup>.

С использованием уравнения (4) путем варьирования абсолютной газопрооницаемостью получена зависимость начального градиента от абсолютной проницаемости (рис. 4). Поскольку нефтенасыщенность пласта составляет 0,38 %, выполнен пересчет начального градиента фильтрации с учетом ОФП для нефти.

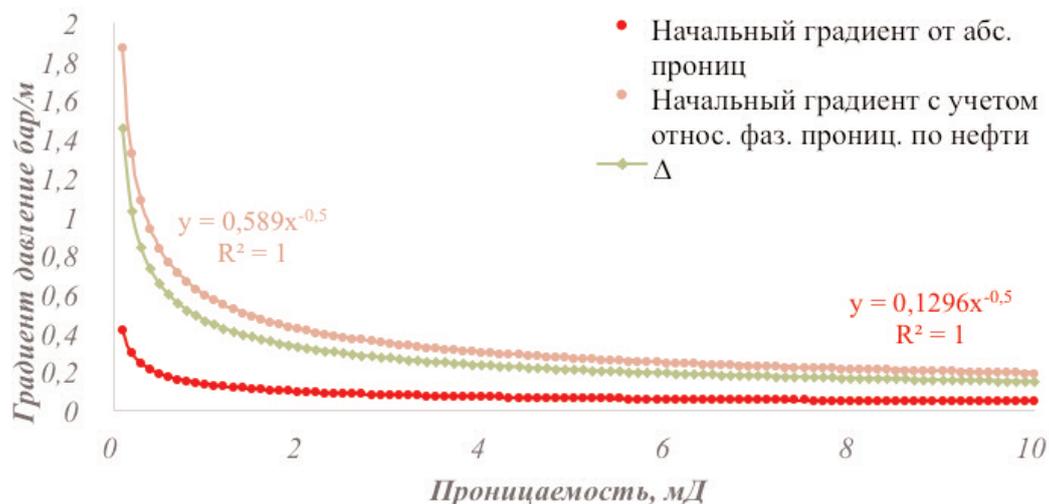


Рис. 4. Определение начального градиента фильтрации с учетом и без учета абсолютной фазовой проницаемости

Предельные градиенты фильтрации (рис. 5) рассчитаны по формуле [7, 8]

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{12 \cdot 10^{-5} \rho d_3^2}{mk^{2/3}} v_{кр}^2, \quad (5)$$

где  $v_{кр}$  – критическая скорость фильтрации;  $d_3$  – эффективный диаметр песчинок м.

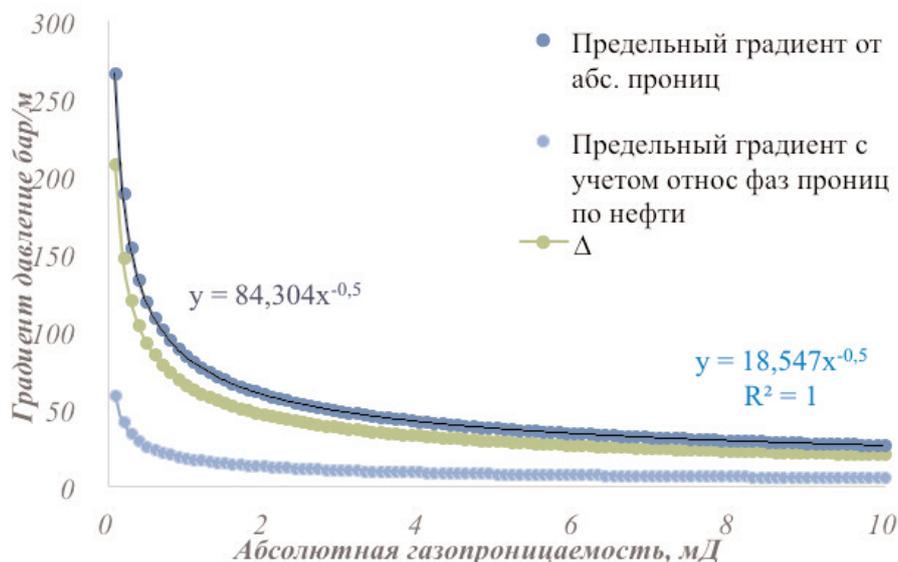


Рис. 5. Определение предельного градиента фильтрации с использованием абсолютной газопрооницаемости и поправки, учитывающей относительную фазовую проницаемость

С использованием аналитических и экспериментальных зависимостей проведена адаптация гидродинамической модели участка месторождения имени В.Н. Виноградова. Результаты адаптации представлены на рис. 6.

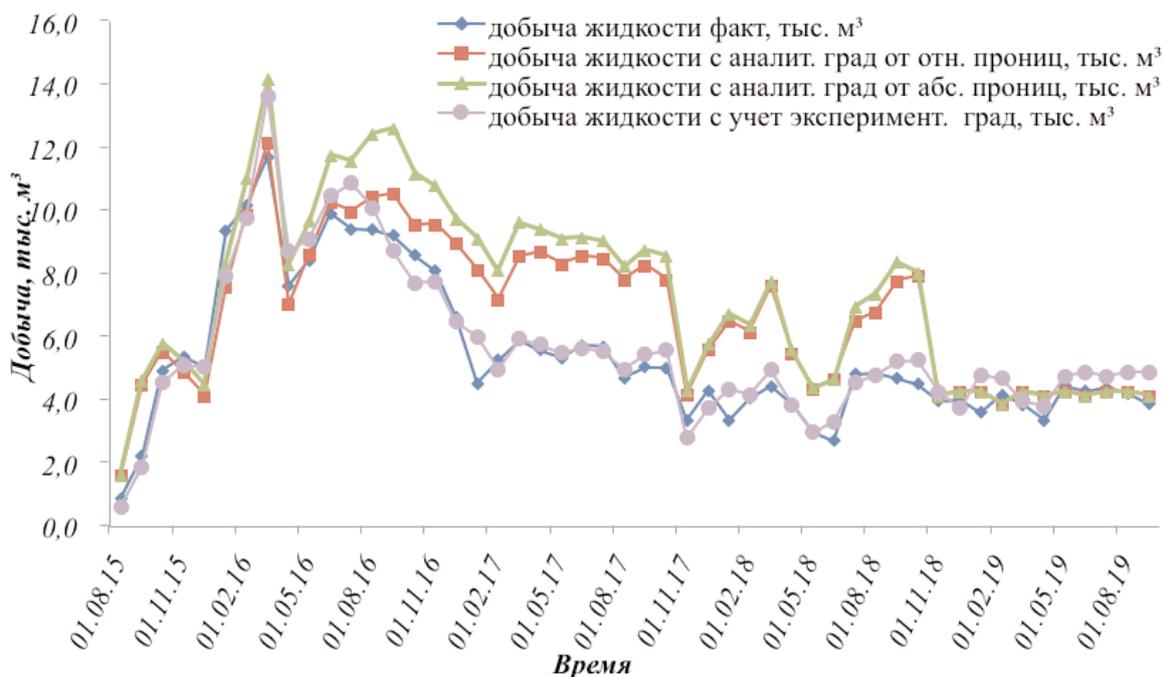


Рис 6. Результаты адаптации гидродинамической модели модели

Аналитическая и экспериментальная зависимости позволили адаптировать имеющуюся историю разработки участка, однако в результате использования аналитической зависимости без учета поправки, учитывающей ОФП, получена меньшая добыча жидкости, чем фактическая. Использование результатов аналитических расчетов с поправкой дало возможность довольно точно воспроизвести историю работы скважин.

### Выводы

1. Использование функции OVRG позволило улучшить качество адаптации гидродинамической модели месторождения им. В.Н. Виноградова.
2. Эффективные начальные градиенты давлений, полученные в результате проведенных экспериментов при фильтрации флюидов, показали, что в зонах пласта с абсолютной проницаемостью выше  $(5-8) \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> течения жидкостей подчиняются линейным законам фильтрации. В зонах низких проницаемостей наблюдаются ярко выраженные нелинейные эффекты.
3. Использование аналитических зависимостей для расчета критических градиентов фильтрации позволило выполнить адаптацию модели к истории разработки.

**Список литературы**

1. *Нелинейная* фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Анализ и интерпретация лабораторных исследований керна Приобского месторождения / В.А. Байков, Р.Р. Галеев, А.В. Колонских и др. // Научно-технический вестник «НК «Роснефть» – 2013. – Т. 2. – № 31. – С. 8–12.
2. *Нелинейная* фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Влияние на технологические показатели разработки месторождения / В.А. Байков, Р.Р. Галеев, А.В. Колонских и др. // Научно-технический вестник «НК «Роснефть». – 2013. – Т. 2. – Вып. 31. – С.17–19.
3. *Нестационарная* фильтрация в сверхнизкопроницаемых коллекторах при низких градиентах давлений / В.А. Байков, А.В. Колонских, А.К. Макастров и др. // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 10. – С. 52–56.
4. *Байков В.А., Давлетбаев А.Я., Иващенко Д.С.* Моделирование притока жидкости к скважинам в низкопроницаемых коллекторах с учетом нелинейной фильтрации // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 11. – С. 54–58.
5. *Шевченко О.Н.* Определение значений критических градиентов давления и скорости фильтрации неньютоновской жидкости // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 3(45), ч. 2. – С. 120–124.
6. *Чилингар Г.В., Еременко Н.А., Арье А.Г.* Аномально высокие пластовые давления в природных геофлюидодинамических системах // Геология нефти и газа. – 1997. – № 5. – С. 19–27.
7. *Шевченко О.Н.* Особенности процесса многофазной фильтрации в условиях нарушения линейного закона Дарси // Успехи современной науки. – 2016. – № 2. – С. 52–56.
8. *Шевченко О.Н.* Определение критических значений скоростей фильтрации в условиях нарушения закона Дарси // Успехи современной науки и образования. – 2016. – № 2. – С. 140–145.