

Новый подход к интерпретации экспериментов на низкопроницаемом керне по определению градиентов давления

Актуальность и цели работы

□ Актуальность работы

Сокращение доли легко извлекаемых запасов нефти, ввод в эксплуатацию объектов с **низкими фильтрационно-емкостными свойствами**

Основные проблемы, осложняющие разработку: **высокие темпы падения дебитов и забойных давлений, приводящие к неподтверждению проектных уровней добычи нефти**

Основная причина – низкая проницаемость и высокая неоднородность коллектора, как следствие **ограниченная зона дренирования скважин** из-за проявления нелинейной фильтрации

При гидродинамическом моделировании необходимо учитывать **отклонение скорости фильтрации жидкости от линейного закона Дарси**

□ Цели

1. Интерпретация результатов исследований низкопроницаемого ядра по определению параметров нелинейной фильтрации

Обработка результатов экспериментов с помощью линеаризации нелинейной части фильтрационной кривой (!**НОВЫЙ ПОДХОД!**)

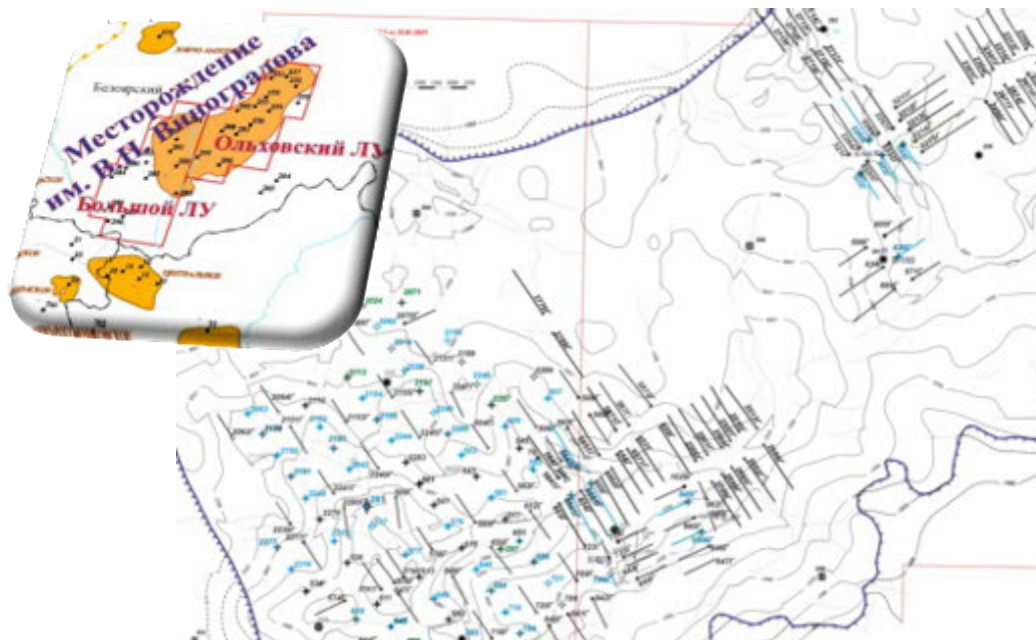
Обработка результатов экспериментов с помощью экстраполяции линейной части фильтрационной кривой (**методика ООО «РН-УфаниПИнефть»**)

2. Использование результатов интерпретации эксперимента при гидродинамическом моделировании

Адаптация ГДМ по данным фактической эксплуатации скважин с учетом экспериментальных значений градиентов давления

Оценка влияния эффекта нелинейной фильтрации на прогноз добычи нефти на ГДМ

Объект исследования – залежь пласта АС₃ месторождения им. В.Н. Виноградова

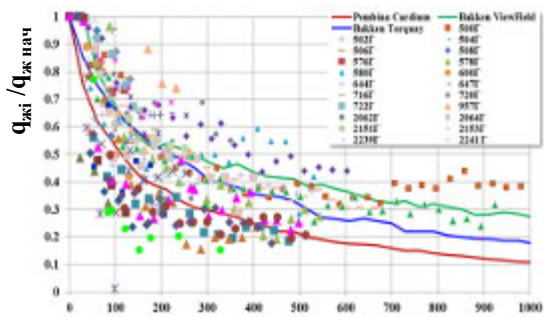


Сведения о месторождении

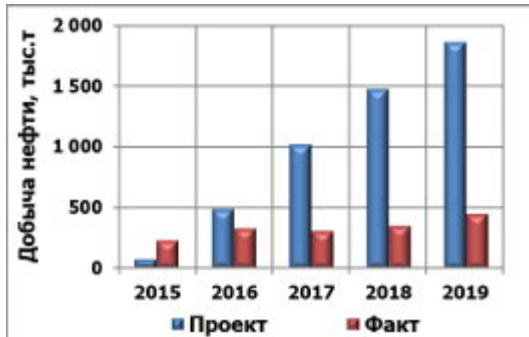
- Введено в разработку в 2013г
- По запасам – крупное (НИЗ > 65 млн.т)
- Низкопроницаемый коллектор (Кпр ~ 1 мд)
- Недонасыщенный коллектор (Sn нач ~ 40%)
- Низкая нефтенасыщенная толщина ~ 6 м

Проблемы разработки объекта АС₃ месторождения им. В.Н. Виноградова

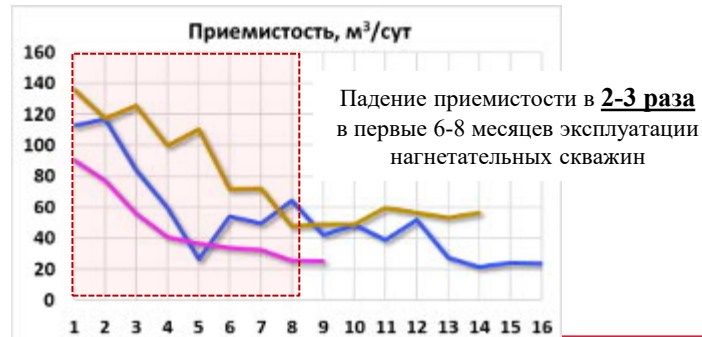
Высокие темпы падения дебитов (50-70% за 6 месяцев)



Отклонение фактической добычи нефти от плановой



Низкая приемистость нагнетательных скважин, неочевидная эффективность системы ППД



Фильтрационные исследования по определению параметров нелинейной фильтрации на керне месторождения им. В.Н. Виноградова

- ❖ Проведены лабораторные исследования низкопроницаемого керна из залежи пласта АС₃ месторождения им. В.Н. Виноградова по определению параметров нелинейной фильтрации;
- ❖ Для проведения эксперимента было подготовлено 10 образцов керна с разной проницаемостью (от 0,7 до 10 мД);
- ❖ Исследования проводились при однофазной фильтрации нефти на образцах керна с остаточной водонасыщенностью.



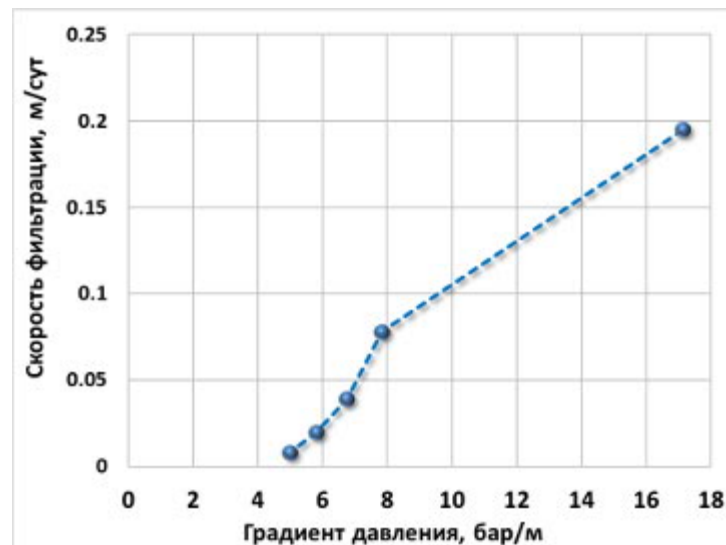
Задачами исследований являлось определение проницаемости и градиентов давлений на различных режимах прокачки жидкости от максимального 0,02 см³/мин с последующим снижением скорости подачи жидкости для выделения зоны начала нелинейных процессов;

Автоматизированная установка, предназначенная для фильтрационных исследований низкопроницаемых коллекторов при сверхнизких скоростях фильтрации

Результаты эксперимента на примере одного из образцов

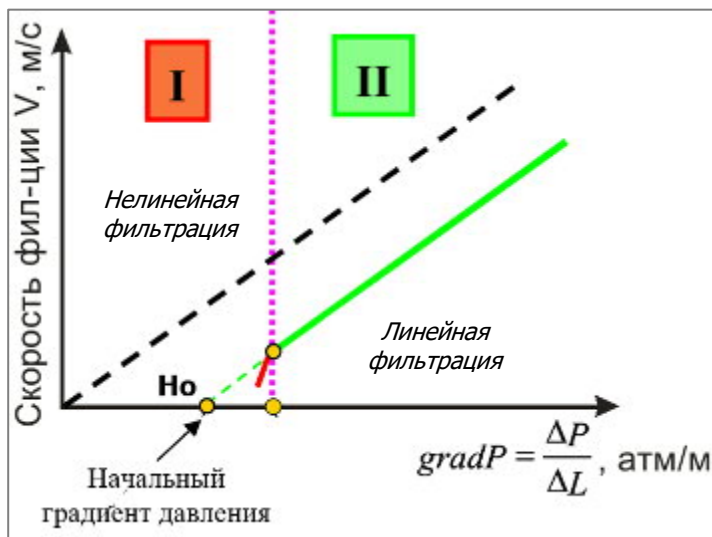
Расход флюида см ³ /мин	Перепад давления бар	Градиент давления бар/м	Проницаемость, 10 ⁻³ мкм ²	Линейная скорость фильтрации м/сут
0,02	2,916	6,13	0,044	0,7800
0,01	1,809	7,24	0,035	0,3900
0,005	0,656	7,13	0,049	0,1950
0,002	0,299	7,83	0,043	0,0780
0,001	0,258	6,746	0,025	0,0390
0,0005	0,222	5,791	0,014	0,0195
0,0002	0,191	4,980	0,007	0,0078

Типовая экспериментальная зависимость скорости фильтрации от градиента давления

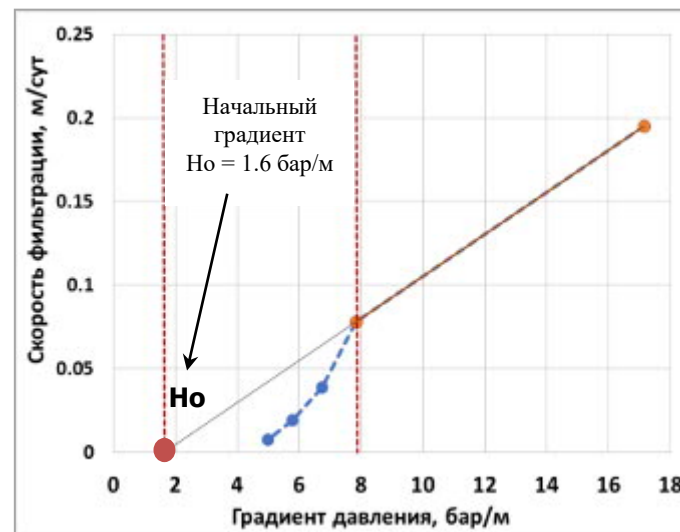


Интерпретация результатов лабораторных исследований по методике ООО «РН-УфаниПИнефть»

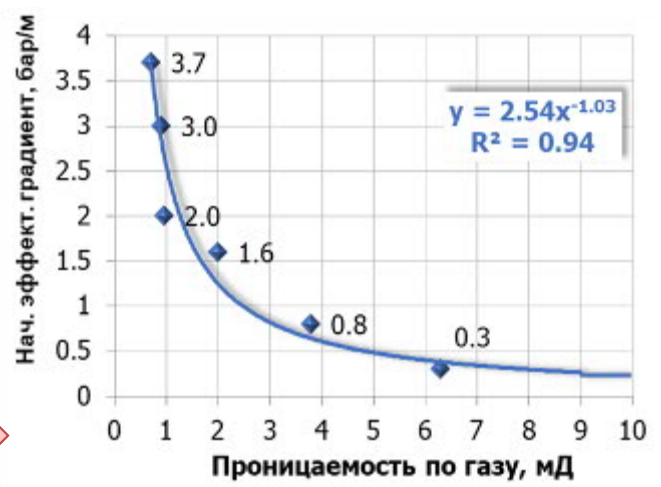
Методика интерпретации результатов экспериментов на низкопроницаемом коллекторе Приобского месторождения



Применение методики интерпретации на низкопроницаемом коллекторе месторождения им. В.Н. Виноградова



- ❖ В ООО «РН-УфаниПИнефть» были проведены лабораторные исследования нелинейных эффектов в низкопроницаемой пористой среде продуктивных отложений Приобского месторождения;
- ❖ Интерпретация результатов экспериментов заключалась в выделении линейной части фильтрационной кривой и экстраполяции ее на ось абсцисс, таким образом **определялся начальный градиент давления Ho** ;
- ❖ Применяв данный способ интерпретации к экспериментальным исследованиям керна на месторождении им. В.Н. Виноградова была построена зависимость начального градиента давления от проницаемости по газу.



Новый метод интерпретации результатов лабораторных исследований низкопроницаемого керн по определению начального градиента давления

$$|V_{\phi}| = \frac{K}{\mu} (|\text{grad}P| - H_0) \quad (1)$$

Закон фильтрации с начальным градиентом давления в низкопроницаемых коллекторах

$$q_{\text{жи}} = \frac{\pi R_i^4 \Delta P}{8\mu L} = \frac{S_i^2 \Delta P}{8\pi\mu L} = \frac{K_i F \Delta P}{\mu L} \quad (2)$$

Формула Дарси – Пуазейля - проницаемость i-го капилляра прямо пропорциональна квадрату его площади в поперечном сечении

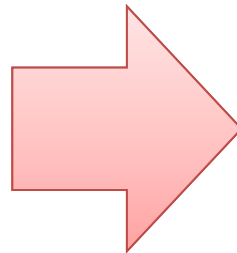
$$\text{Здесь } V_{\phi} = \frac{q_{\text{ж}}}{F} \text{ и } \text{grad}P = \frac{\Delta P}{L}$$

$$|\text{grad}P| = \frac{A}{K_{\text{нп}}^u} \quad (3)$$

Связь между начальным градиентом давления, и проницаемостью коллектора описывается степенной функцией

С учетом (2 и 3) уравнение скорости фильтрации может быть представлено в следующем виде

$$|V_{\phi}| = \frac{K_0}{\mu} |\text{grad}P| - \frac{\frac{1}{Au}}{\mu (|\text{grad}P|)^{\frac{(1-u)}{u}}}$$

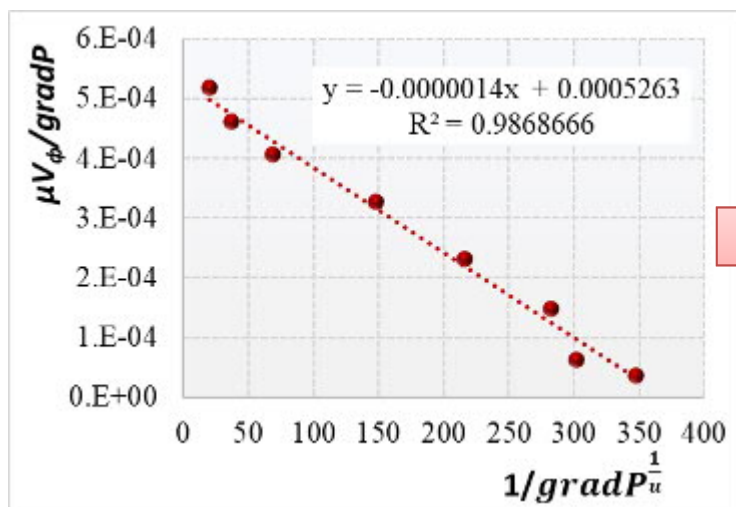


$$\frac{\mu |V_{\phi}|}{|\text{grad}P|} = K_0 - \frac{\frac{1}{Au}}{|\text{grad}P|^{\frac{1}{u}}}$$

Здесь K_0 , A , u – неизвестные параметры, для их нахождения выражение скорости фильтрации преобразовано в линейное уравнение

Новый метод интерпретации результатов лабораторных исследований низкопроницаемого керна по определению начального градиента давления

Пример построения линейной зависимости по одному из образцов керна



- ❖ Параметры подбирались таким образом, чтобы получились линейные уравнение с максимальными значениями корреляции R^2 между X и Y;
- ❖ По коэффициентам найденных линейных уравнений, определялись параметры K_0 и A ;
- ❖ K_0 характеризует величину, к которой приближается проницаемость керна при высоких градиентах давления;

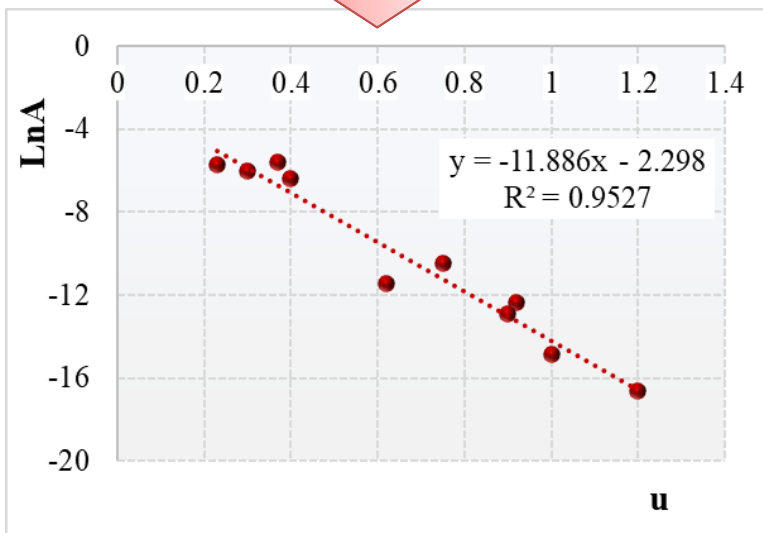
На основании обработки результатов исследований всей коллекции образцов керна между параметрами A и u установлена довольно тесная эмпирическая связь, которая в линейной форме имеет вид

$$\ln A = \ln B - u \cdot C$$

или в степенной форме

$$A = B C^{-u}$$

B и C – коэффициенты эмпирической зависимости



Результаты интерпретации. Сопоставление с ранее полученными данными

$$A = BC^{-u}$$

Подставляем степенное выражение в уравнение фильтрации

$$|V_{\phi}| = \frac{K_0}{\mu} |\text{grad}P| - \frac{\frac{1}{A\bar{u}}}{\mu(|\text{grad}P|)^{\frac{(1-u)}{u}}}$$

$$|V_{\phi}| = \frac{K_0}{\mu} |\text{grad}P| - \frac{\frac{1}{B\bar{u}}}{C \cdot \mu(|\text{grad}P|)^{\frac{(1-u)}{u}}}$$

При значении параметра $u=1$ начальный градиент давления равен:

$$H_0 = \frac{B}{CK_0}$$

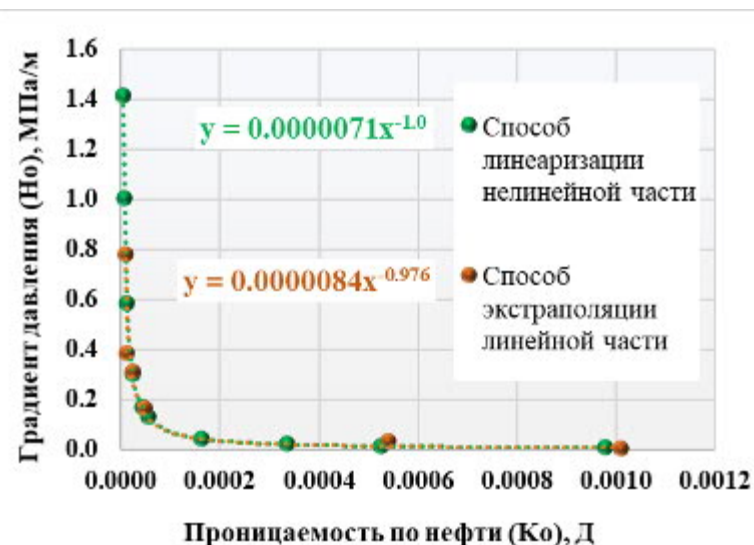
Результаты интерпретации

Закон фильтрации с начальным градиентом давления приобретает вид:

$$|V_{\phi}| = \frac{K_0}{\mu} \left(|\text{grad}P| - \frac{B}{CK_0} \right)$$

! Сравнение значений H_0 , найденных с помощью экстраполяции линейной части фильтрационной кривой и путем линеаризации нелинейной части показывает их хорошую сходимость

№ образца	Проницаемость по нефти (K_0), мкм ²	Начальный градиент давления (H_0), МПа/м
1	0.00034	0.021
2	0.00053	0.013
3	0.00098	0.007
5	0.00016	0.042
6	0.00004	0.165
7	0.00005	0.127
8	0.00002	0.296
9	0.000005	1.386
10	0.00001	0.572

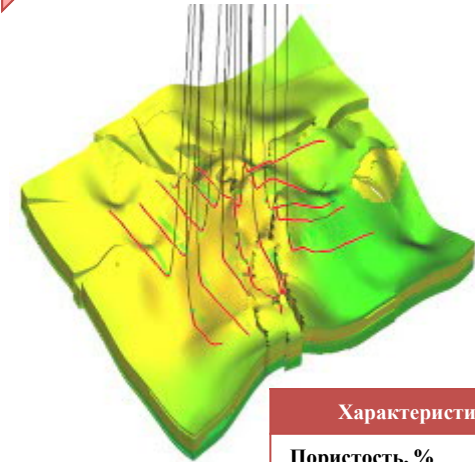
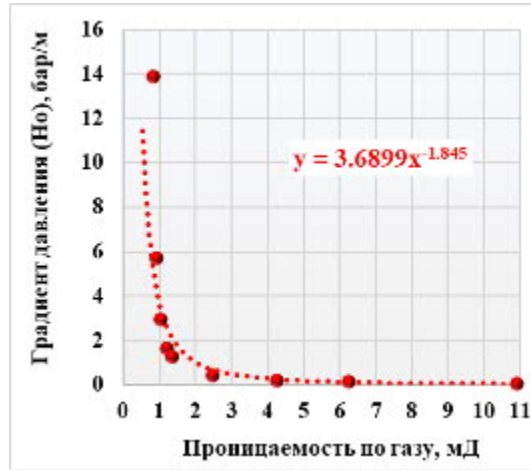
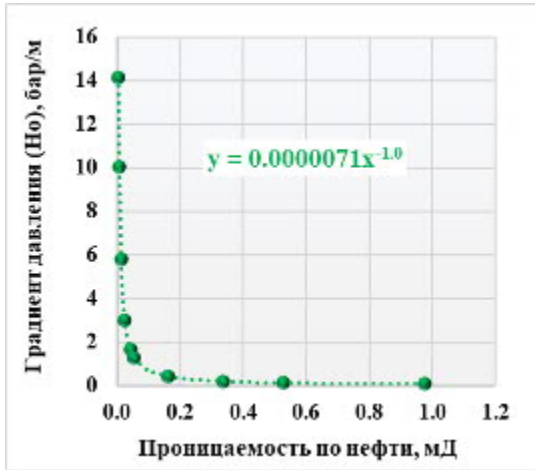


Адаптация ГДМ по данным фактической эксплуатации скважин с учетом экспериментальных градиентов давления

Зависимость начального градиента давления от проницаемости по нефти

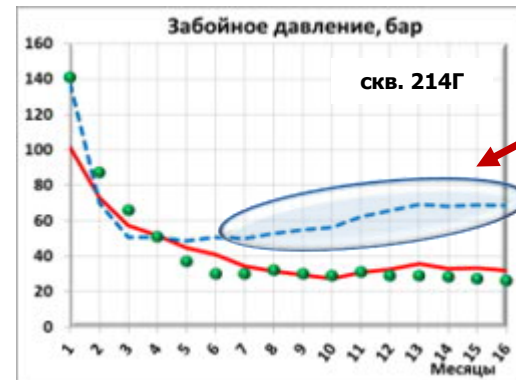
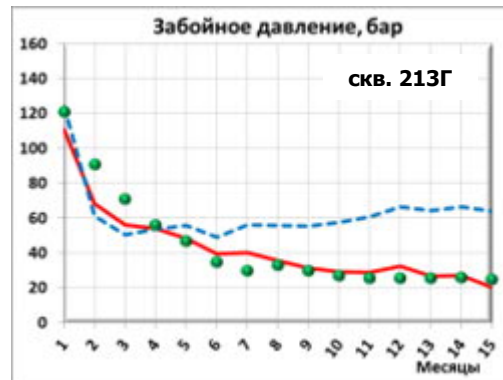
Зависимость начального градиента давления от проницаемости по газу для использования в гидродинамической модели

Секторная модель для исследовательских расчетов с использованием зависимости градиента от проницаемости



Характеристики сектора	
Пористость, %	19
Нефтенасыщенность, %	40
Проницаемость, мД	1,5

Результаты адаптации забойных давлений по скважинам



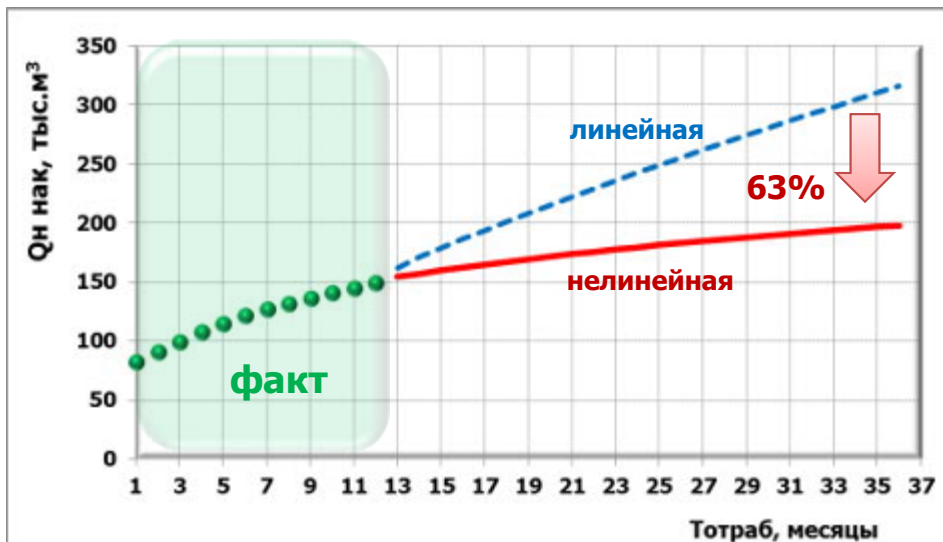
Без учета нелинейной фильтрации забойное давление растет, т.е. зона дренирования скважины не ограничена

Прогноз добычи нефти на гидродинамической модели с учетом и без учета нелинейной фильтрации

Накопленная добыча нефти по скважинам



Накопленная добыча нефти в целом по сектору



- Прогноз технологических показателей разработки без учета функции нелинейной фильтрации приводит к **завышению накопленной добычи нефти** по скважинам на **24-110%**
- Удельная добыча нефти на одну скважину за расчетный период составляет:
 - ✓ без учета нелинейной фильтрации ~ **30 тыс.м³**
 - ✓ с учетом нелинейной фильтрации ~ **19 тыс.м³**
- В целом по сектору **разница в добыче нефти** между вариантами **составляет 63%**
- Существенное превышение прогнозной добычи нефти над фактической приводит к некорректной оценке рентабельности скважин.

Выводы

- ❑ **Проведена интерпретация** лабораторных исследований низкопроницаемого керна по определению параметров нелинейной фильтрации:
 - ❖ С помощью экстраполяции линейной части фильтрационной кривой (методика ООО «РН-УфаНИПИнефть»)
 - ❖ **! НОВЫЙ ПОДХОД !** С помощью линеаризации нелинейной части фильтрационной кривой
- ❑ В результате интерпретации лабораторных исследований **получены зависимости начального градиента давления от эффективной проницаемости по нефти;**
- ❑ Значение градиента давления уменьшается с ростом проницаемости и наоборот, существенно увеличивается с ее уменьшением;
- ❑ **Сравнение градиентов давления**, полученных с помощью способа линеаризации и с помощью экстраполяции линейной части фильтрационной зависимости **показывают их хорошую сходимость;**
- ❑ Выполнена адаптация гидродинамической модели с использованием полученной экспериментальной зависимости. Установлено, что **учет нелинейной фильтрации в ГДМ повышает качество ее адаптации по истории разработки;**
- ❑ Установлено, что в условиях разработки низкопроницаемого коллектора **прогнозирование уровней добычи нефти должно осуществляться с учетом нелинейных эффектов** для повышения достоверности прогнозных показателей.