

## Оценка зоны дренирования скважины и эффективности системы поддержания пластового давления в низкопроницаемом коллекторе по данным анализа мини-гидроразрыва пласта в уплотняющих горизонтальных скважинах с многостадийным гидравлическим разрывом

Д.З. Ишкин, И.З. Муллагалин, Г.А. Нигаметьянова, Э.М. Салимгареева\*  
ООО «Уфимский научно-технический центр», г. Уфа, Россия  
E-mail: \*salimgareevaem@ufntc.ru

**Аннотация.** Низкая эффективность классических методов гидродинамических исследований при решении задач разработки месторождений углеводородов с низко- и сверхнизкопроницаемыми коллекторами заставляет инженеров применять косвенные подходы, один из которых – анализ кривых падения давления при проведении операций мини-гидроразрыва пласта и основного гидроразрыва пласта для оценки пластового давления методом Нолте. В работе рассмотрены вопросы получения качественной характеристики выработки запасов участка месторождения с трудноизвлекаемыми запасами, разрабатываемого линейной системой скважин с расстоянием в 500 м, посредством оценки зон дренирования скважин и влияния системы поддержания пластового давления в пласте с проницаемостью 1 мД и меньше, на основании восстановления картины его энергетического состояния в межскважинном пространстве методом Нолте по данным кривых падения давления, зарегистрированным при мини- и основном гидроразрывах пласта, по количественным и качественным оценкам пластового давления для каждого порта горизонтальной скважины с многостадийным гидравлическим разрывом пласта.

**Ключевые слова:** трудноизвлекаемые запасы, гидродинамические исследования скважин, горизонтальная скважина, пластовое давление, мини-гидроразрыв пласта, гидроразрыв пласта, многостадийный гидравлический разрыв пласта, метод Нолте, низкая проницаемость, сверхнизкая проницаемость.

**Для цитирования:** Ишкин Д.З., Муллагалин И.З., Нигаметьянова Г.А., Салимгареева Э.М. Оценка зоны дренирования скважины и эффективности системы поддержания пластового давления в низкопроницаемом коллекторе по данным анализа мини-гидроразрыва пласта в уплотняющих горизонтальных скважинах с многостадийным гидравлическим разрывом // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. Вып. 2(37). С. 175–185. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art13>

### Введение

Важнейшими задачами при разработке нефтяных месторождений являются оценка эффективности системы поддержания пластового давления (ППД) и определение зоны дренирования добывающих скважин для результативного бурения боковых стволов и возможности уплотняющего бурения. Для их решения производят анализ текущего энерге-

тического состояния по картам изобар или путем построения геолого-гидродинамических моделей. Оба подхода требуют наличия представительных замеров пластового давления, дефицит которых остро ощущается на объектах с низко- и сверхнизкопроницаемыми коллекторами из-за выбора между необходимостью исследований и длительными остановками скважин и добычи.

По этой причине представляется актуальной задача максимизации информации об энергетическом состоянии залежи всеми известными и желательно независимыми друг от друга методами, один из которых – регистрация кривых падения давления (КПД) при операциях мини-гидроразрыва пласта (миниГРП) и гидроразрыва пласта (ГРП) сразу после бурения скважины.

Настоящая работа рассматривает качественную характеристику выработки трудноизвлекаемых запасов участка месторождения X (пласты АС10.1), со сформированной линейной системой разработки скважин с расстоянием в 500 м, посредством определения зон дренирования добывающих скважин, а также оценку работы системы ППД по характеристике энергетического состояния, полученной методом Нолте [1] по данным КПД при операции миниГРП/ГРП с предварительным экспериментальным исследованием его применимости.

#### **Цели и задачи работы**

В условиях проявления эффекта нелинейной фильтрации (уменьшения скорости фильтрации при низких градиентах давления на удалении от скважины [2]) в пластах с низкими и сверхнизкими фильтрационно-емкостными свойствами (1 мД и менее), зона дренирования добывающих скважин может быть крайне невысока относительно расстояния между ними (100 м при расстоянии между скважинами в 500 м [2]). Это ставит под сомнение возможность создания эффективной системы ППД в период разработки месторождения [3].

Цель настоящей работы – исследование зоны дренирования добывающих скважин и

оценка влияния на них нагнетательных скважин на основании данных об энергетическом состоянии пласта в зоне уплотняющего бурения горизонтальными скважинами (ГС) с множественным гидроразрывом.

В работе были поставлены следующие задачи:

1. Исследование точности метода Нолте, используемого для оценки пластового давления при обработке и интерпретации КПД, регистрируемых во время миниГРП/ГРП.
2. Оценка пластовых давлений по методу Нолте в межскважинном пространстве после бурения уплотняющих ГС с многостадийным гидроразрывом пласта (МГРП).
3. Оценка зоны влияния нагнетательных скважин и радиуса дренирования добывающих скважин по картине энергетического состояния пласта.
4. Определение успешности применения метода Нолте и выработка предложений по ее повышению.

#### **Краткая характеристика метода Нолте**

Кривые падения давления, регистрируемые и обрабатываемые по методу Нолте [1], показали свою информативность при оценке пластового давления как для низкопроницаемых/сверхнизкопроницаемых коллекторов [4–5], так и для коллекторов со средними значениями проницаемости [6].

Технология исследования заключена в создании незакрепленной трещины небольшой длины при закачке жидкости в продуктивный пласт с последующей остановкой, во время которой при расформировании репрессивной воронки в пласте образуются характерные псевдолинейный и псевдорadiaльный режимы течения.

Обработка КПД позволяет диагностировать признаки этих режимов и впоследствии решать задачу прогнозирования пластового давления по соответствующим формулам [1].

К критериям применимости метода относятся:

- 1) наличие невозмущенного поля давлений;
- 2) превышение радиуса исследования зоны кольматации буровым раствором или технологическими жидкостями;
- 3) использование ньютоновских технологических жидкостей.

В случае исследования уплотняющих ГС с МГРП пункт 1 может быть нарушен по причине бурения в уже вырабатываемую зону, но для низко- и сверхнизкопроницаемых коллекторов градиенты давления значительны в окрестности самих скважин, а на удалении, в межскважинном пространстве, пренебрежимо малы. Наиболее критичен первый пункт при анализе КПД, записанных при повторных миниГРП/ГРП

для уже эксплуатирующихся скважин, однако, не являющихся предметом рассмотрения настоящей работы.

### Исследование применимости метода для изучаемого объекта

Проверка применимости метода Нолте на изучаемом объекте проведена экспериментальным путем для 12 наклонно-направленных скважин (НС), вскрывающих пласт АС10.1 (трудноизвлекаемые запасы), месторождения X с характерными значениями пористости менее 20%, проницаемости менее 1 мД.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. После операции миниГРП/ГРП производилось освоение вновь пробуренной скважины с записью кривой восстановления уровня (КВУ) на притоке и контролем всех операций забойным манометром. Получаемые оценки  $P_{пл}$  методом Нолте по КПД (псевдолинейный режим течения) сравнивались с последними точками КВУ.

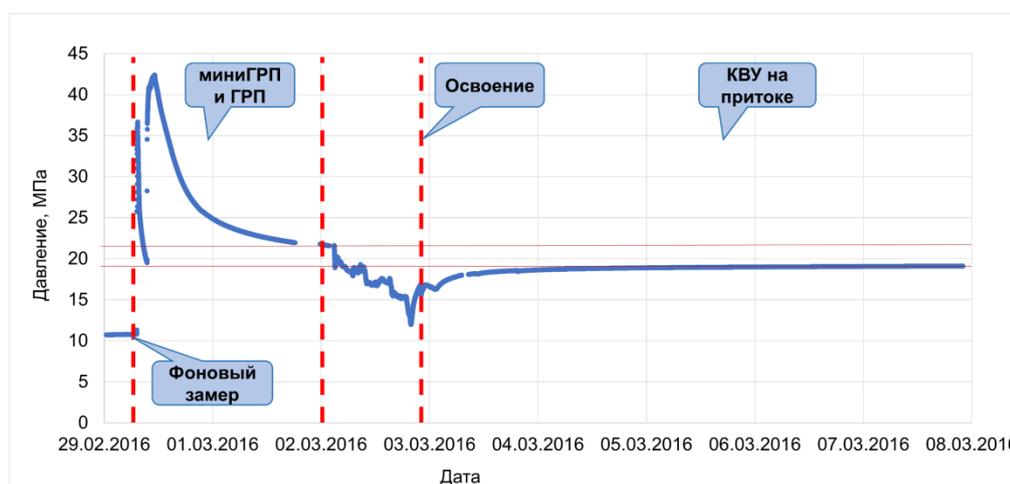
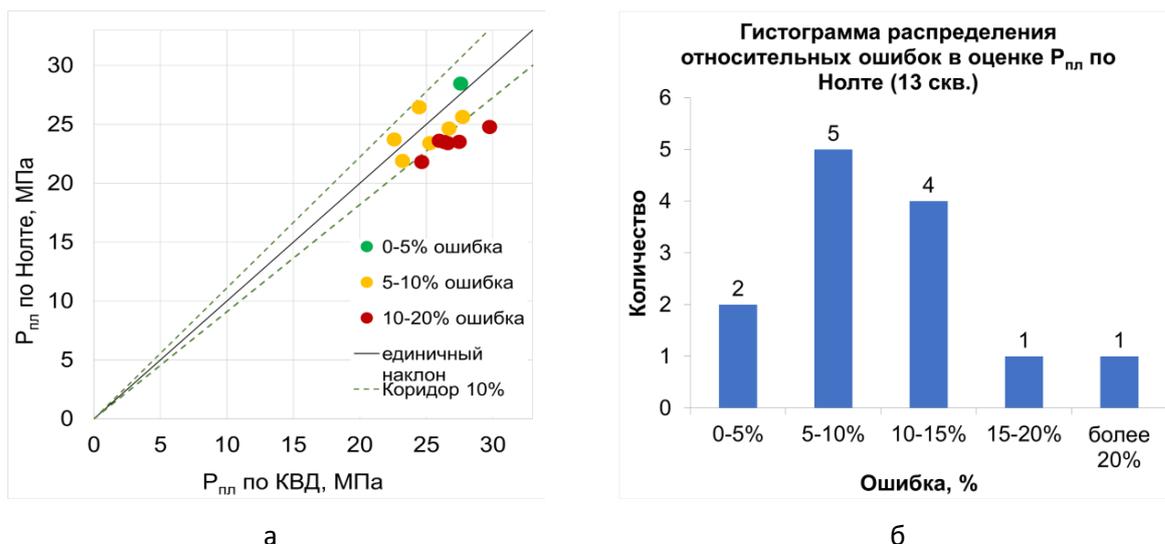


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

По результатам сопоставления минимальная ошибка в определении  $P_{пл}$  методом Нолте составила 3%, максимальная – 20% (рис. 2). Наблюдается тенденция в переоценке  $P_{пл}$  методом Нолте, вызванная

дренированием скважиной зоны повышенного давления, образовавшейся во время первичного вскрытия скважины и не успевшей расформироваться в период непродолжительной остановки на исследование.



**Рис. 2.** Оценка  $P_{пл}$  методом Нолте: а – кросс-плот оценок; б – гистограмма распределения относительных ошибок

В целом, медианное значение ошибки в 8% свидетельствует об удовлетворительной для решения промысловых задач точности метода.

**Оценка успешности метода Нолте**

Рассмотренная выше применимость метода Нолте для ННС дает основание его использования в случае ГС с МГРП для оценки распределения пластового давления в межскважинном пространстве.

Анализ КПД при миниГРП/ГРП выполнялся в 17 скважинах для 151 стадии ГРП (151 точка в межскважинном пространстве, в которых оценивалось пластовое давление), представляющих из себя этапы замещения, миниГРП и ГРП (227 КПД). Из-за непродолжительного времени регистрации КПД (средняя длительность – 7,6 ч) лишь в 25% случаев удалось выделить характерные режимы течения (псевдолинейный и псевдорадialный) и оценить прогнозное  $P_{пл}$  по Нолте.

Анализ был дополнен качественной оценкой пластового давления в области каждого из портов – предлагаемый авторами подход (рис. 3) заключался в использовании

последней точки по КПД в качестве оценки пластового давления «сверху» (рис. 4): пониженные значения таких оценок свидетельствуют об интерференции окружающих добывающих скважин (при этом по методу Нолте оценка может быть не получена из-за недостижения режимов течения).

**Оценка зоны влияния нагнетательных скважин и зоны дренирования добывающих**

Полученные согласно предлагаемой схеме (см. рис. 3) результаты по оценке пластового давления для скважин ГС с МГРП уплотняющего бурения были использованы для оценки энергетического состояния и характера выработанности запасов основной сеткой скважин в межскважинном пространстве. Выводы строились по поточечному восстановлению энергетического состояния пласта в межскважинном пространстве (напротив портов), позволяющему диагностировать значимую интерференцию добывающих скважин (пониженное  $P_{пл}$  относительно начального) или доминирующее влияние системы ППД (повышенное  $P_{пл}$  относительно начального).



Рис. 3. Общая схема анализа данных миниГРП и ГРП для оценки энергетического состояния пластов

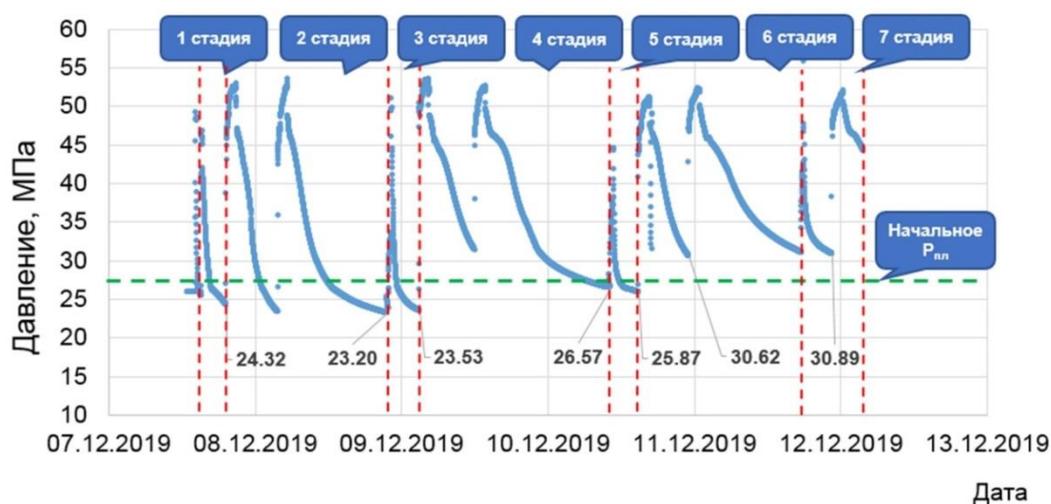
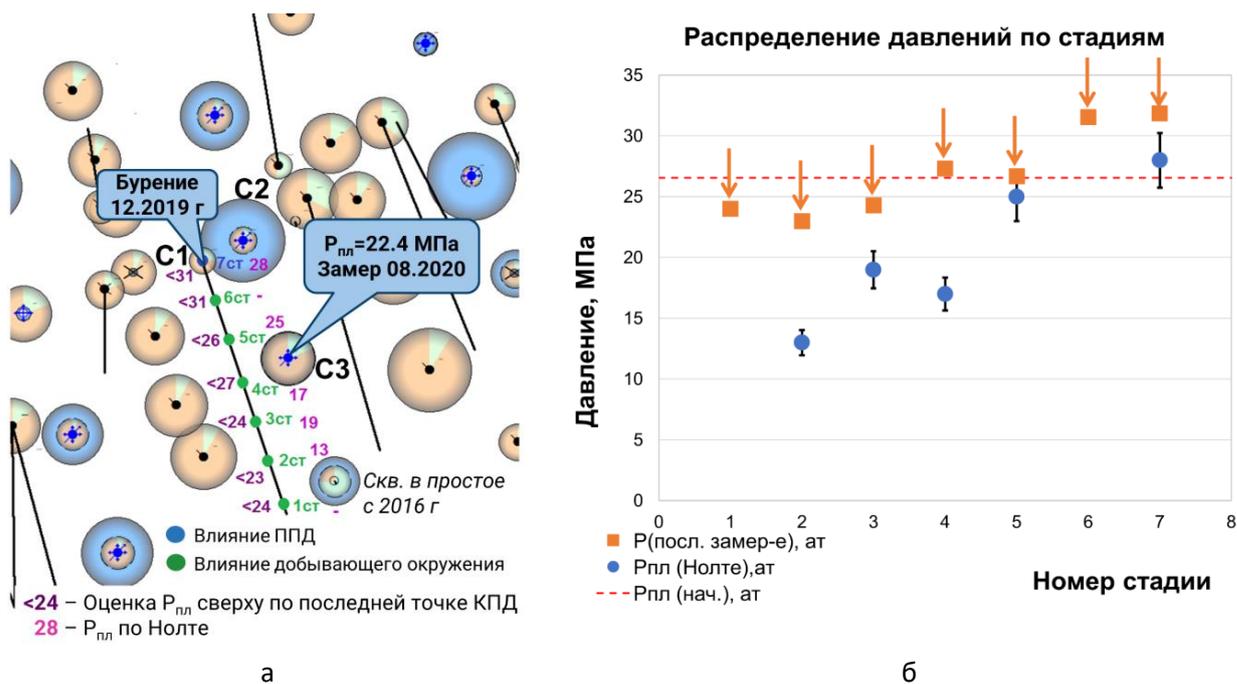


Рис. 4. Кривая изменения давлений с забойного датчика в момент проведения операции многостадийного ГРП в скважине С1

Полученные оценки пластового давления по методу Нолте на примере скважины С1 (рис. 5) показывают его неравномерное распределение по стволу скважины: напротив нагнетательной скважины С2 (порт 7) отмечается повышенное значение. На первых портах давление снижено за счет работы соседнего добывающего ряда, что подтверждается замером  $P_{пл}$  в соседней нагнетательной

скважине С3 – 21,67 МПа (при начальном  $P_{пл} = 25,7$  МПа).

Зона влияния нагнетательной скважины оценивается в 166 м (на момент бурения ГС с МГРП закачка велась 7 лет), зона дренирования добывающих скважин – в среднем 264 м на седьмой год работы добывающих скважин (зоны оценивались по расстоянию от исследуемого порта до забоя влияющей скважины).



**Рис. 5.** Распределение оценок  $P_{пл}$  по стволу скважины С1:  
 а – на карте накопленных отборов; б – в зависимости от стадии

Таким образом, для скважины С1 удалось установить выработку запасов в межскважинном пространстве на участке, соответствующем середине расстояния между скважинами основной сетки, при изначальной сетке скважин в 500 м и работе системы ППД.

Верхняя временная граница начала этих процессов составляет 7 лет (завышенная оценка), т. е. установлен диапазон времени от момента запуска скважины в течение последующих 7 лет ее работы, в которые произошло формирование зоны дренирования, превышающей середину расстояния между скважинами.

Дать более точную оценку не представляется возможным по причине несоответствия, а именно, опережения времени начала этих процессов (зона дренирования скважины достигла участка, соответствующего середине расстояния между скважинами основной сетки) и времени их обнаружения (через какое-то

время после достижения скважиной рассматриваемого участка в его зоне пробурена уплотняющая ГС с МГРП, и в зоне участка выявлены пониженные, относительно начального, пластовые давления).

Наблюдающийся разброс значений по горизонтальному стволу свидетельствует о неоднородности выработки пласта, связанной не только с неравномерной закачкой, но и с латеральной неоднородностью коллекторских свойств [3].

### Статистическая оценка зоны дренирования добывающих скважин

Описанный выше анализ выполнен для оценки зоны дренирования добывающих скважин в 17 скважинах на основе 52 исследований: радиус дренирования оценивался в диапазоне от 81 до 344 м (в среднем 208 м) при времени их работы от 1,5 до 9 лет (рис. 6).

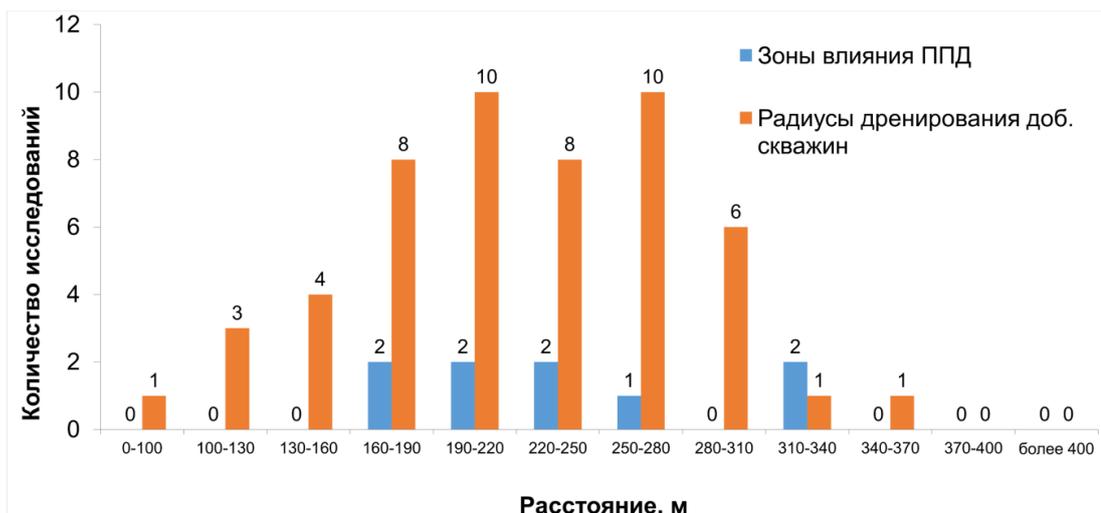


Рис. 6. Распределение радиусов дренирования и зоны влияния ППД

Небольшое количество найденных зон влияния ППД (9 исследований) обусловлено меньшей выборкой из-за невысокой степени успешности метода Нолте при оценке  $R_{пл}$ , тогда как определение влияния добывающих скважин выполнено по результатам оценок  $R_{пл}$  по Нолте и по косвенным оценкам пластового давления «сверху». Так, из 151 стадии (151 оценка  $R_{пл}$  напротив того или иного порта) в 52 из них диагностировано влияние добывающих скважин, в 9 – нагнетательных, в 90 – не определено. Тем не менее отмечаются случаи обнаружения зон

повышенного давления, являющиеся свидетельством работы системы ППД.

На рис. 7 показаны оценки радиусов дренирования скважин основной сетки (широкий диапазон радиусов связан со смещенностью проводки уплотняющего горизонтального ствола относительно ранее сформированных рядов скважин основной сетки – так, «пятка» ГС может быть ближе к одному из двух соседних рядов, а «носок» – ближе к другому), вошедших в экспериментальную выборку, с завышенными оценками времени их достижения.

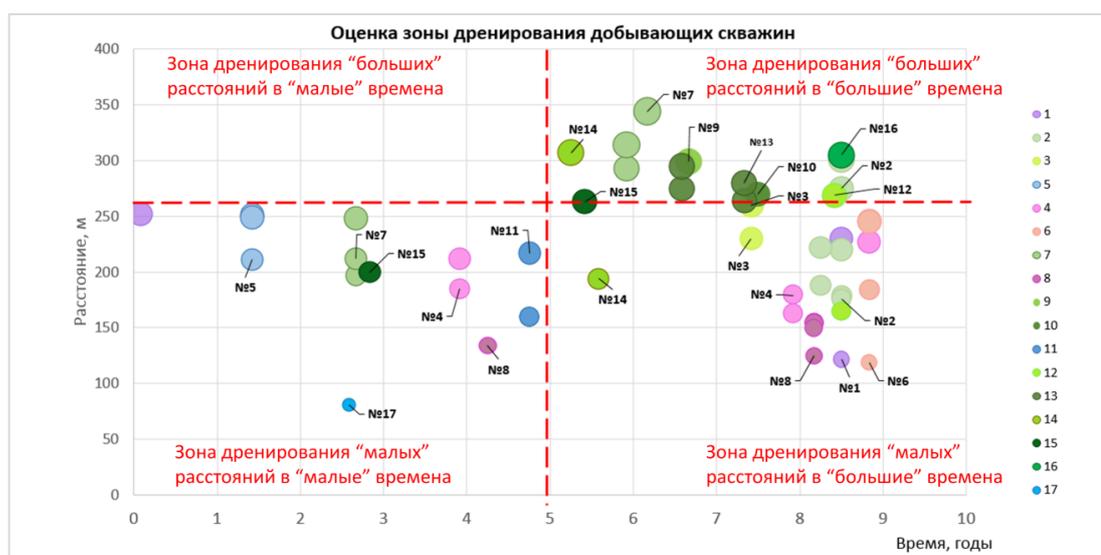


Рис. 7. Оценка зоны дренирования в зависимости от времени работы скважины (диаметр пузырьков пропорционален величине радиуса дренирования)

Несмотря на завышенные оценки, в рамках выборки установлено, что нет экспериментов, показавших значения радиуса дренирования, большее 250 м (середина расстояния между скважинами основной сетки), достигнутого во времени, меньшем 5 лет. Последнее свидетельствует о работе скважин низкопроницаемого пласта в течение 5 лет в режиме без интерференции соседних скважин, как добывающих, так и нагнетательных.

Большой разброс оценок времени достижения «малых» расстояний (до 250 м) связан как с неоднородностью коллекторских свойств, так и с запаздыванием в обнаружении достижения зоной дренирования определенного радиуса. Диапазон этих оценок варьируется от 1,5 до 9 лет.

Таким образом, для 35% исследований из изученной выборки зона дренирования достигает половины расстояния между скважинами основной сетки через 5 лет после начала эксплуатации, что находится в пределах срока разработки нефтегазового месторождения.

Небольшой объем проанализированной выборки (четверть обработанных исследований) связан с малой успешностью метода Нолте по оценке пластовых давлений.

#### **Пути повышения успешности метода Нолте**

Невысокая успешность получения оценок пластового давления методом Нолте обусловлена отсутствием процедуры проектирования КПД для оценки пластового давления при миниГРП/ГРП. Достаточное (1–5 ч) время остановки скважины для определения ключевых показателей технологии последующего проведения ГРП слишком мало для оценки пластового давления.

Ситуация усугубляется при использовании устьевого манометра для контроля всей операции: успешность в определении  $P_{пл}$  в таком случае не превышает 19%, что обусловлено регистрацией прибором КПД первых часов остановки скважины, после которых прибор демонтируется, хотя скважина продолжает простаивать.

Подлежащие проектированию исследования методом диагностического нагнетательного теста [5, 6] для определения пластового давления и проницаемости пласта, основанные на схожих принципах создания небольшой незакрепленной трещины, показывают эффективность при оценке проектов [5], но экономически не оправданы для уже разрабатываемых коллекторов, что делает задачу повышения успешности метода Нолте для технологии миниГРП/ГРП крайне актуальной. Пути решения заключены во включении элемента проектирования для оценки  $P_{пл}$ : использование забойных манометров для контроля давления, проектирование незакрепленных трещин необходимых размеров для достижения режимов течения, увеличение времени исследования.

Практика последних лет показывает развитие по этому пути: в компаниях «Газпромнефть», «Роснефть», «Сургутнефтегаз» операции гидроразрыва на ННС и ГС с МГРП проводятся с использованием забойных манометров [4]. В компании «Татнефть» в рамках экспериментальной работы для определения оптимального времени достижения режимов принято решение об увеличении длительности КПД, процедура контролируется забойными манометрами [6].

Переход от метода к технологии позволит оценивать не только пластовые давления по псевдолинейным режимам течения, но и откроет возможность оценки проницаемости пласта по псевдорadiaльному режиму течения.

В подтверждение действенности предлагаемых решений на рис. 8 показан

монотонный рост успешности в получении оценок  $P_{пл}$  по методу Нолте в зависимости от длительности регистрации КПД (резкий рост успешности исследований с длительностью более 18 ч связан с меньшей выборкой по сравнению с исследованиями длительностью менее 18 часов).



Рис. 8. Распределение успешности исследований миниГРП в зависимости от длительности регистрации КПД

## Заключение

1. Исследование точности метода Нолте относительно методически зарекомендовавших себя гидродинамических исследований скважин на нестационарных режимах проводилось для выборки наклонно-направленных скважин (в горизонтальных скважинах проведение экспериментов по сравнению параметров экономически и технически не представляется возможным). Сопоставление оценок пластового давления с оценками кривой восстановления уровня при освоении скважины после ГРП показало, что медианная ошибка в определении  $P_{пл}$  по методу Нолте в 8% достаточна для решения промысловых задач. Метод имеет тенденцию к завышению пластового давления.

2. Дальнейшее применение метода в горизонтальных скважинах было результативным для четверти всех рассмотренных кривых падения давления, т. е. в 25% случаев продолжительности исследований было достаточно для выявления режимов течения (длительность, как правило, невысока и нацелена на решение задачи проектирования ГРП), по которым давалась оценка пластового давления. Невысокая результативность обусловлена отсутствием проектирования КПД для оценки именно пластовых параметров. Повышение результативности возможно путем видоизменения технологии проведения миниГРП/ГРП.

3. Показано, что несмотря на невысокую успешность метода Нолте, оценки пластовых давлений по последним точкам КПД могут быть применены в качестве оценок сверху для характеристики энергетического состояния залежи, а также оценки зон дренирования добывающих скважин. Приведена общая схема работы по использованию результатов записи КПД для количественной и качественной оценок энергетического состояния пласта.

4. Установлено, что выработка запасов в межскважинном пространстве при основной сетке в 500 м для пласта с проницаемостью менее 1 мД происходит для

ряда скважин более чем через 5 лет после начала эксплуатации скважин, что находится в пределах срока разработки нефтегазового месторождения. Для ряда скважин также отмечается время достижения меньших расстояний (150 м) за период времени 8–9 лет. Такое различие в поведении скважин может быть объяснено неоднородностью латеральных свойств изучаемых пластов.

#### Благодарности

Авторы благодарят к.ф.-м.н. Емченко Ольгу Владимировну и д.т.н., профессора Федорова Вячеслава Николаевича за ценные идеи и обсуждения работы.

#### Литература

1. Nolte K.G., Maniere J.L., Owens K.A. After-closure analysis of fracture calibration tests // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 5–8 October 1997. Paper SPE-38676-MS. P. 333–348. <https://doi.org/10.2118/38676-MS>
2. Невмержицкий Я.В. Об особенностях гидродинамических исследований скважин в низкопроницаемых коллекторах // Труды МФТИ. 2017. Т. 9, № 2. С. 46–56.
3. Салимгареева Э.М., Емченко О.В., Муллагалин И.З. и др. Выявление механизмов работы системы ППД для низкопроницаемого коллектора на базе комплексного анализа данных разработки, ГДИ и литолого-фациального анализа // ГеоКалининград-2021. Нефтегазовая, рудная геология и геофизика: Сборник трудов X Международной научно-практической конференции, г. Калининград, 26–30 апреля 2021. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2021. С. 107–111.
4. Асалхузина Г.Ф., Давлетбаев А.Я., Ильясов А.М. и др. Анализ кривых падения давления после нагнетательных тестов при гидроразрыве пласта // Нефтяное хозяйство. 2016. № 11. С. 41–45.
5. Usmanova A., Smith P., Rylance M. After closure analysis as an appraisal approach // SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition, Moscow, Russia, 24–26 October 2016. Paper SPE-181968-MS. 35 p. <https://doi.org/10.2118/181968-MS>
6. Ишкин Д.З., Муллагалин И.З., Лутфуллин А.А. и др. Анализ результатов контроля забойного давления при ГРП, миниГРП для определения пластового давления // Геология и недропользование. 2021. № 1. С. 88–93. <https://www.imgre.ru/images/2021/Biblio21/geonedro.pdf> (Дата обращения 25.05.2022).

## Estimation of well drainage radius and reservoir pressure maintenance system efficiency in a tight reservoir by the data obtained by minifrac in the offset horizontal wells with multfrac

D.Z. Ishkin, I.Z. Mullagalin, G.A. Nigametyanova, E.M. Salimgareeva\*

Ufa Scientific and Technical Center LLC, Ufa, Russia

E-mail: \*salimgareevaem@ufntc.ru

**Abstract.** The low efficiency of classical methods of well testing during the development of hydrocarbon fields with tight and ultra-tight reservoirs forces engineers to use indirect approaches, one of which is the analysis of pressure drop curves during minifrac and main hydraulic fracturing operations to estimate reservoir pressure by the Nolte method. The paper focuses on obtaining a qualitative assessment of reserve recovery for an area of a field with hard-to-recover reserves with the wells arranged linearly and the distance between them of 500 m by estimating the drainage area and the impact of the pressure maintenance system in a reservoir with permeability of 1 mD or less based on restored inter-well reservoir pressure from the Nolte after-closure analysis of falloff data by quantitative and qualitative pore pressure estimations for each of the frac ports in a horizontal well with multfrac.

**Keywords:** hard-to-recover reserves, well tests, horizontal well, reservoir pressure, minifrac, hydraulic fracturing, multfrac, Nolte after-closure method, low permeability, ultra-low permeability.

**Citation:** *Ishkin D.Z., Mullagalin I.Z., Nigametyanova G.A., Salimgareeva E.M.* Estimation of well drainage radius and reservoir pressure maintenance system efficiency in a tight reservoir by the data obtained by minifrac in the offset horizontal wells with multfrac // Actual Problems of Oil and Gas. 2022. Iss. 2(37). P. 175–185. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art13> (In Russ.).

### References

1. *Nolte K.G., Maniere J.L., Owens K.A.* After-closure analysis of fracture calibration tests // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 5–8 October 1997. Paper SPE-38676-MS. P. 333–348. <https://doi.org/10.2118/38676-MS>
2. *Nevmerzhitskiy Y.V.* On well tests features in the low-permeability reservoirs // Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology (State University). 2017. Vol. 9, No. 2. P. 46–56. (In Russ.).
3. *Salimgareeva E.M., Emchenko O.V.* Pressure maintenance mechanism detection for tight reservoir through integrated approach including reservoir engineering and well test data and litho-facial analysis // GeoKaliningrad-2021. Petroleum and Mining Geology and Geophysics: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference. Tver: PolyPress LLC, 2021. P. 107–111. (In Russ.).
4. *Asalkhuzina G.F., Davletbaev A.Ya., Ilyasov A.M.* et al. Pressure fall-off analysis after test injections during hydraulic fracturing // Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry. 2016. No. 11. P. 41–45. (In Russ.).
5. *Usmanova A., Smith P., Rylance M.* After closure analysis as an appraisal approach // SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition, Moscow, Russia, 24–26 October 2016. Paper SPE-181968-MS. 35 p. <https://doi.org/10.2118/181968-MS>
6. *Ishkin D.Z., Mullagalin I.Z., Lutfullin A.A.* et al. Reservoir pressure determination: analysis of the results of bottomhole pressure monitoring in the course of fracturing and DFIT // Geology and Subsoil Use. 2021. No. 1. P. 88–93. <https://www.imgre.ru/images/2021/Biblio21/geonedro.pdf> (Accessed on 25.05.2022). (In Russ.).