

На правах рукописи



ЧЕРЕПАНОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ
КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ
(на примере турне-фаменских отложений
Соликамской депрессии)**

Специальность 25.00.12 - Геология, поиски и разведка
нефтяных и газовых месторождений

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) Министерства образования и науки Российской Федерации на кафедре «Нефтегазовые технологии».

Научный руководитель доктор геолого-минералогических наук, доцент **Галкин Сергей Владиславович** (ПНИПУ, г. Пермь)

Официальные оппоненты:

Масагутов Рим Хакимович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, начальник отдела управления запасами и ГРП департамента геолого-разведочных работ ОАО АНК «Башнефть».

Потехин Денис Владимирович, кандидат технических наук, начальник управления геологического моделирования и подсчета запасов Филиала ООО «ЛУКОЙЛ – Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми.

Ведущая организация: ООО «ПИТЦ «Геофизика»

Защита состоится «_____» _____ 2016 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.083.03 в ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева 15, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул. Букирева 15.

Электронная версия текста диссертации доступна на сайте ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: www.psu.ru

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ: vak.ed.gov.ru/vak и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»: www.psu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



О.Ю. Мещерякова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Актуальность проведенного диссертационного исследования определяется тем, что к карбонатным рифовым массивам турне-фаменского возраста месторождений Соликамской депрессии приурочена существенная доля запасов углеводородного сырья. При этом отличительным признаком данных залежей является наличие зон с развитой трещиноватостью коллекторов, изучение свойств которых с использованием стандартных методов, как показала практика, не всегда приводит к достоверным результатам. С учетом невысокой освещенности отложений керновым материалом, изучение особенностей геологического строения для указанных объектов является нерешенной до конца задачей. В этой связи существенно возрастает роль других способов получения информации о свойствах пласта, в том числе гидродинамических исследований скважин.

Объект исследования. Объектом исследования являются турне-фаменские коллектора нефтяных месторождений Соликамской депрессии.

Предмет исследования. Особенности геологического строения, фильтрационные и емкостные параметры коллекторов различных видов пустотности.

Цель работы. Исследование и совершенствование методов оценки трещиноватости турне-фаменских отложений месторождений Соликамской депрессии с целью повышения достоверности прогнозирования распространения коллекторов и эффективности геологического обеспечения разработки нефтяных залежей.

Основные задачи исследований.

1. Анализ применяемых в настоящее время способов оценки трещиноватости карбонатных коллекторов.
2. Анализ и оценка возможностей гидродинамических исследований скважин при изучении трещиноватости турне-фаменских коллекторов месторождений Соликамской депрессии.
3. Разработка комплексной методики оценки трещиноватости турне-фаменских коллекторов месторождений Соликамской депрессии.
4. Рассмотрение возможностей решения актуальных геолого-промысловых задач с применением результатов разработанной методики.

Научная новизна.

1. На основе модели Уоррена-Рута разработана методика выделения коллекторов трещинного типа для карбонатных турне-фаменских отложений Соликамской депрессии
2. Впервые установлено, что в пределах турне-фаменских нефтяных залежей Соликамской депрессии наблюдается зональность распространения трещинных и поровых коллекторов.

3. Разработанная методика позволила для турне-фаменских эксплуатационных объектов месторождений Соликамской депрессии повысить эффективность геолого-гидродинамического моделирования с учетом выделения зон развития коллекторов трещинного типа.

Практическая значимость работы

Разработанная методика позволяет оценивать емкостные и фильтрационные характеристики коллекторов трещинно-порового типа и их пространственное распространение по площади залежи нефти в любой период ее разработки, в том числе в условиях низкой освещенности керновым материалом.

Выявленные закономерности пространственного размещения коллекторов различных видов пустотности позволяют выработать обоснованный подход к рационализации процессов выработки запасов нефти.

Полученные качественные и количественные оценки параметров трещиноватости позволяют повысить эффективность геолого-гидродинамического моделирования, что показано на примере фаменской залежи нефти Озерного месторождения.

Основные защищаемые положения.

1. Методика оценки трещиноватости карбонатных коллекторов турне-фаменских отложений месторождений Соликамской депрессии по данным гидродинамических исследований скважин методом восстановления давления.

2. Установлена зональность развития трещинных коллекторов для турне-фаменских залежей нефти Соликамской депрессии.

3. Разработанная комплексная методика позволяет отслеживать изменение характеристик трещиноватости в период разработки залежей нефти.

Апробация работы и публикации.

Основные положения диссертационной работы отражены в 11 научных работах, в том числе в восьми статьях по списку ВАК; в материалах Международной научно-практической конференции «Развитие науки и образования в современном мире» (Москва, 2016).

Фактический материал.

Для достижения поставленной цели в работе использованы следующие основные материалы и данные:

- Исходные данные по 540 кривым восстановления давления (уровня) добывающих скважин месторождений Соликамской депрессии, каждая из которых обрабатывалась шестью методами;
- Литолого-фациальные модели резервуаров (для Маговского, Гагаринского и Озерного месторождений);

- Материалы подсчета запасов и проектные документы по наиболее значимым месторождениям Соликамской депрессии;
- Данные проведения стандартных и специальных геофизических исследований скважин;
- Результаты проведения рентгеномографических исследований на 30 образцах керна;
- Данные по добыче (история) скважин за весь период их эксплуатации;
- Геолого-гидродинамические модели залежей.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст изложен на 111 страницах машинописного текста, иллюстрирован 45 рисунками и содержит 9 таблиц. Список литературы включает 104 наименования.

Благодарности.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю - доктору геолого-минералогических наук С. В. Галкину, а так же благодарность за консультации и поддержку в работе над диссертацией доценту кафедры «Нефтегазовые технологии» ПНИПУ И. Н. Пономаревой, а также В. А. Лобанову.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и основные задачи исследования, защищаемые положения, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе рассматриваются наиболее распространенные методы изучения трещиноватости коллекторов, обобщен опыт их использования применительно к карбонатным турне-фаменским отложениям Соликамской депрессии. Решение данных задач в диссертации рассмотрено на примере Гагаринского, Озерного, Маговского, Шершневого и Сибирского нефтяных месторождений.

Следует отметить, что набор инструментов, используемых для изучения трещиноватости коллекторов к настоящему времени, как правило, ограничивается исследованиями керна в совокупности со стандартным комплексом ГИС, который дополнен в некоторых случаях волновым акустическим каротажем (ВАК).

На нефтяных месторождениях Пермского края в обязательный комплекс ГИС в скважинах после бурения (в открытом стволе) включены следующие методы: радиоактивный каротаж (ННК-т, ГК, ГГК-п), боковое каротажное зондирование (БКЗ), кавернометрия (ДС), микрозондирование (МКЗ),

боковой (БК) и микробоковой (МБК) каротаж, индукционный (ИК) каротаж, акустическая цементометрия (АКЦ) и инклинометрия.

Применительно к изучению особенностей геологического строения карбонатных пород рифовых резервуаров Соликамской депрессии разработана методика (Некрасов, Князев, 2004 г.) оценки трещиноватости с использованием стандартного комплекса ГИС. В работе [Тиаб, 2009 г.) рассмотрены условия эффективного применения методов ГИС при оценке трещиноватости (в том числе FMI, скважинного акустического телевизора и др.). Анализ данной проблемы позволил сделать в работе [2] вывод, что основные проблемы применения методов ГИС для оценки трещиноватости коллекторов связаны с жесткими требованиями, предъявляемыми к буровым растворам.

В диссертации проанализирован опыт применения методов ГИС для оценки трещиноватости коллекторов турне-фаменского возраста месторождений Соликамской депрессии. Установлено, что в ряде случаев различные «косвенные» методы демонстрируют противоположные результаты, вступая в противоречие с промысловыми характеристиками объектов. Так, например, для турне-фаменских коллекторов Маговского месторождения результаты интерпретации трещиноватости по ГИС (по методике ОАО «ПНГ») весьма слабо коррелируются с акустическими признаками трещиноватости (прибор ВАК-Д). Кроме этого, методы, основанные на изучении керна и интерпретации ГИС, могут фиксировать наличие не естественной трещиноватости, а техногенных трещин, образованных в результате первичного вскрытия продуктивного пласта. Таким образом, методы ГИС в силу различных причин не в полной мере решают вопрос достоверного изучения трещиноватости коллекторов.

В дополнение к методам ГИС обязательным при оценке коллекторов является исследование шлифов, полученных для образцов керна. Геологами Пермского края накоплен значительный опыт по изучению керна методом шлифов, проанализировав который, можно сделать выводы об основных преимуществах и недостатках метода. Главными недостатками метода следует считать невысокую освещенность разреза представительным керном (в силу различных причин, от технико-технологических до экономических). Также необходимо отметить сомнительную достоверность определения фильтрационных характеристик трещин по данным керна и невозможность изучения трещин больших размеров.

Одним из перспективных возможностей изучения кернового материала является рентгеновская томография. Метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры неоднородных объектов, основанный

на измерении и компьютерной обработке разности ослабления рентгеновского излучения веществом различным по плотности.

Применительно к изучению особенностей строения пустотного пространства горных пород метод рентгеномногографических исследований керна является довольно новым. Методом рентгеновской томографии в работе [10] изучены фильтрационно-емкостные свойства для месторождений Пермского края, а также трещиноватость карбонатных юрских отложений месторождения Парсанкуль (Республика Узбекистан).

С целью изучения трещиноватости карбонатных отложений рифовых резервуаров Соликамской депрессии выполнены рентгеномногографические исследования полноразмерного керна. На рис.1 приведена томограмма для нефтенасыщенного интервала скважины 379 Уньвинского месторождения. Трещиноватость коллектора в зоне дренирования скважины подтверждена специальными геофизическими и гидродинамическими исследованиями, а также описанием шлифов. В результате выполненных томографических исследований на полноразмерном керне выявлены трещины (рис. 1).

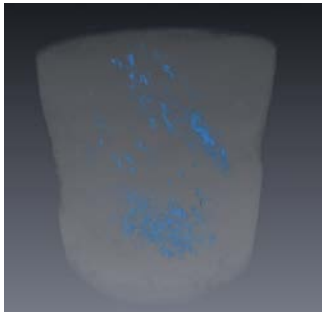


Рис.1. Результаты рентгеновской томографии образца керна

Гидродинамические методы исследования скважин (ГДИ) применительно к изучению трещиноватости рекомендуют использовать многие исследователи (Денк, 2002; Донцов, 1985; Котяхов, 1977 и др.). Перспективность привлечения материалов ГДИ к изучению трещиноватости не вызывает сомнений, однако необходима промысловая проверка известных методов, выделение наиболее достоверных из них и определение условий их эффективного применения.

Существуют подходы по оценке трещиноватости при проведении ГДИ методом установившихся отборов (по индикаторным диаграммам) и при исследованиях методом восстановления давления (по кривым восстановления давления). Признаком трещиноватости коллектора, как известно, является выпуклость индикаторной диаграммы к оси дебитов. Однако существует целый ряд факторов, которые также приводят к

искривлению индикаторной диаграммы (инерционная составляющая фильтрационного сопротивления, разгазирование нефти), и разделить влияние каждого из этих факторов на форму индикаторной диаграммы не представляется возможным.

Значительно более перспективными являются исследования методом восстановления давления. Существует ряд методов интерпретации кривых восстановления давления (КВД), основанных на абсолютно разных моделях. В этой связи представляет значительный интерес их анализ и апробация к условиям турне-фаменских отложений месторождений Соликамской депрессии.

Во второй главе приведено описание и выполнен анализ применимости различных методов обработки КВД с определением параметров трещиноватости турне-фаменских отложений месторождений Соликамской депрессии. С этой целью в диссертации привлечены материалы более 500 исследований нефтедобывающих скважин, эксплуатирующих данные отложения.

На основании выполненного литературного обзора к рассмотрению выбраны: метод, основанный на использовании модели «двойной пористости» в программном комплексе SAPHIR (KAPPA Eng.); метод, основанный на использовании модели Уоррена-Рута; метод Полларда; метод детерминированных моментов давления (ДМД).

По данным анализа результатов интерпретации привлеченных кривых восстановления давления (уровня) в программном комплексе SAPHIR установлены некоторые затруднения. Основной причиной является невысокое количество дискретных замеров со значительным временным интервалом по механизированным скважинам, необорудованным глубинными измерительными приборами (которые составляют примерно 50 % от общего добывающего фонда). В этом случае вычисление производной Бурдэ, на которой основана диагностика режимов течения, практически невозможно.

Применимость рассматриваемого подхода проверена на примере изучения материалов исследований турне-фаменских отложений Маговского месторождения, где в качестве основного инструмента использован программный комплекс SAPHIR. Из 50-ти рассмотренных КВД обработка выполнена только по 17-ти, и ни в одном случае трещиноватость коллектора не диагностирована. Очевидно, это следует считать ошибочным, поскольку о трещиноватости отложений свидетельствуют промысловые характеристики объектов (Мартюшев, Мордвинов, 2015).

Метод детерминированных моментов давления. При обработке КВД методом ДМД определяется безразмерный диагностический признак d ,

трактовка численного значения которого позволяет диагностировать некоторые особенности строения фильтрационной системы. В работах (Пономарева, 2011) указывается на вероятный разброс граничных величин диагностического признака и необходимость анализа применимости метода на основе анализа имеющегося набора КВД для конкретных геолого-физических условий.

В результате анализа установлено, что основной проблемой использования метода ДМД является нечетко определенное значение граничного диагностического признака, соответствующего трещиноватости коллектора. Авторы методики (Капцанов и др., 1985) указывают на необходимость корректировки этого значения для конкретных условий. По данным статистического анализа нескольких сотен КВД скважин турнефаменских отложений месторождений, приуроченных к Соликамской депрессии, установлено, что признаком трещиноватости является полученное при обработке методом ДМД значение безразмерного диагностического признака менее 1,97. Однако получаемые при обработке методом ДМД числовые значения, например, трещинной проницаемости, принимают в значительной доли случаев нереальные значения. С учетом этого, в диссертации сделан вывод о том, что определение параметров трещиноватости по данному методу не является целесообразным. Вероятной причиной низкой достоверности метода ДМД в условиях развития трещинных коллекторов является использование при его выводе классической формулы притока нефти для порового коллектора.

Метод Полларда. В модели Полларда изменение давления рассчитывается как результат взаимодействия трех областей, которые развиты в трещиноватых пластах: система трещин вокруг скважины; вся трещинная система вдали от скважины и питающая трещины матрица. По мнению Голф-Рахта (1982 г.), модель Полларда, хоть и не учитывает радиальную геометрию течения и сводит задачу к простому процессу расширения, во многих случаях дает приемлемые результаты. В совокупности с простотой применения модели при обработке КВД, методика Полларда после промысловой проверки на пригодность может стать весьма успешным инструментом изучения трещиноватости коллектора.

При оценке возможностей использования метода Полларда установлен ряд факторов, затрудняющих его применение при оценке параметров трещиноватости. Это, в первую очередь, существенная зависимость получаемых результатов от принятой величины пластового давления, значение которого во многих случаях определяется расчетным путем с той или иной погрешностью. Также следует отметить, что форма фактического графика в координатах метода Полларда зачастую отличается от типовых

теоретических КВД. Таким образом, в результате исследований сделан вывод о том, что метод Полларда не является способом достоверной оценки показателей трещиноватости турне-фаменских отложений Соликамской депрессии.

Метод Уоррена-Рута. В модели Уоррена-Рута трещиноватый пласт схематизируется одинаковыми прямоугольными параллелепипедами, разделенными прямоугольной сетью трещин. Соответствие реального коллектора модели Уоррена-Рута выражается особым видом КВД, полученной в скважине, эксплуатирующей коллектор с выраженными трещинами. При этом на КВД выделяется две параллельные линии вместо одной, как это наблюдается для пласта с межзерновой пустотностью, причем для трещиноватого пласта характерно некоторое запаздывание. В (Голф-Рахт, 1982) приводится вывод о том, что именно модель Уоррена-Рута обеспечивает детальное понимание механизма фильтрации в трещиноватом пласте, а обработка КВД в соответствии с моделью позволяет получить ряд важных для практики количественных характеристик трещиноватости: фактическую раскрытость, проницаемость, коэффициент перетока из матрицы и др. Таким образом, вопрос применимости модели Уоррена-Рута процессам фильтрации в коллекторах рифовых отложений Соликамской депрессии также требует проработки.

Для оценки соответствия турне-фаменских коллекторов месторождений Соликамской депрессии модели Уоррена-Рута и применимости соответствующей методики определения параметров трещиноватости, в диссертационной работе выполнено графическое сопоставление КВД в поровых и трещинных коллекторах, проиллюстрированное на рисунке 2. Для сопоставления из общего количества привлеченных данных выбраны пары кривых, характеризующиеся примерно равными значениями забойного и пластового давлений и продолжительностью процесса восстановления давления.

Из анализа представленных на рисунке 2 данных следует, что КВД в гранулярном коллекторе порового типа (в данном случае терригенные визейские отложения) имеет монотонно загущающий вид; на КВД в трещиноватом коллекторе выделяются два параллельных участка и зона перегиба. При проведении исследований получено 27 подобных пар графиков, что подтверждает отличие форм КВД в поровых и трещинных коллекторах.

В дальнейшем все привлеченные КВД проанализированы на соответствие модели Уоррена-Рута и обработаны с определением параметров трещиноватости. В результате анализа установлено, что к недостаткам методики можно отнести качественный подход к оценке наличия на графике КВД параллельных участка и точки (точек) перегиба.

При этом наличие перегиба оценивается визуально и во многом зависит от человеческого фактора. Автором предложены три количественных подхода по оценке соответствия КВД модели Уоррена-Рута, которые предлагается учитывать в комплексе.

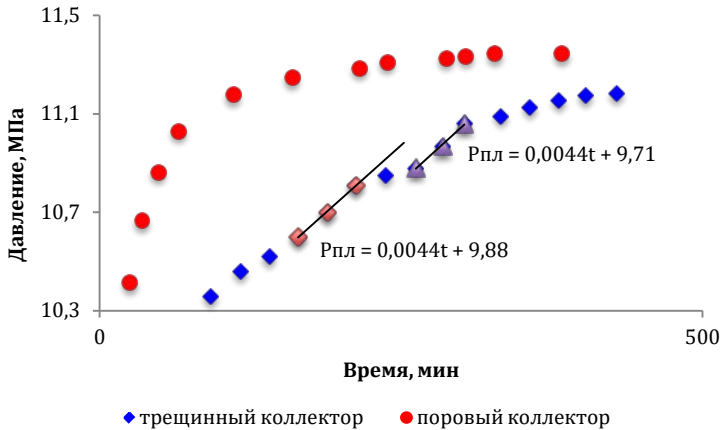


Рис. 2. Графическое сопоставление КВД для порового (гранулярного) и трещиноватого коллекторов

Первый подход заключается в сравнении уравнений, аппроксимирующих графики восстановления давления. Если на всем этапе исследования скважины КВД аппроксимируется полиномом второй степени, это свидетельствует о поровом типе коллектора. Для трещинного коллектора КВД по Уоррену-Руту имеет более сложную форму, поэтому аппроксимируется полиномом третьей (и выше) степени. Еще одним количественным критерием оценки соответствия КВД модели Уоррена-Рута является сравнение угловых коэффициентов линейных уравнений, аппроксимирующих визуально выделенные параллельные участки. Равенство значений угловых коэффициентов ($B=0,0044$) подтверждает параллельность выделенных участков КВД (рис. 2).

Третий подход основан на основах теории исследования функций методами дифференциального анализа. Предлагается наличие точки перегиба оценивать по поведению графика поведения второй производной давления во времени. КВД в поровом (гранулярном) коллекторе, как это следует из теории упругого режима, имеет вид монотонно затухающей функции, для которой не характерно наличие перегибов, экстремумов. Как известно из теории дифференциального исчисления, признаком перегиба функции является нулевое значение второй производной в точке.

Характерный для Уоррена-Рута перегиб характеризуется при смене значений второй производной с отрицательных на положительные (смена выпуклости графика на вогнутость).

На рисунке 2 для примера с поровым коллектором вторая производная давления на всем интервале исследования принимает отрицательные значения, что свидетельствует об отсутствии на графике точек перегиба. Давление в процессе исследования монотонно возрастает. Для примера с трещинным коллектором вторая производная давления меняет свое значение с отрицательного на положительное в точке $t=240$ мин, следовательно в этой точке имеет место перегиб, а форма КВД свидетельствует о трещиноватости коллектора по Уоррену-Руту.

Второй основной проблемой использования метода является необходимость привлечения результатов исследования ядра в части оценки проницаемости матрицы, что представляется неоптимальным для условий низкой освещенности залежей керном. В работе [8] предложено в качестве проницаемости матрицы использовать значение, полученное при обработке заключительного участка КВД (когда волна распределения давления дошла до матрицы породы) с применением специальных методов (стандартных для восстановленных КВД и методов с учетом послепритока для недовосстановленных КВД). Для подтверждения достоверности предложенного подхода выполнено сопоставление проницаемости по керну порового типа ($k_{\text{кern}}$) из работающих по данным расходомерии интервалов и проницаемости, определенной при обработке КВД указанными выше методами ($k_{\text{ГДИ}}$). Весьма жесткие требования к качеству исходной промысловой информации обусловили ограниченность фактических данных для статистической обработки (13 определений).

В результате сопоставления проницаемостей по керну и ГДИ получены следующие значения:

$$k_{\text{кern}} = 10,3 \text{ мД} \pm 13,8 \text{ мД};$$

$$k_{\text{ГДИ}} = 10,8 \text{ мД} \pm 15,0 \text{ мД}.$$

Для $k_{\text{кern}}$ и $k_{\text{ГДИ}}$ проверена статистическая гипотеза о равенстве средних значений при распределении t -Стьюдента. В результате гипотезу о равенстве средних для данной статистической выборки можно принять на уровне значимости 94%. При этом величины $k_{\text{кern}}$ и $k_{\text{ГДИ}}$ имеют друг с другом высокую сходимость ($r = 0,89$), что также подтверждает в данных условиях достоверность оценки проницаемости матрицы по ГДИ при обработке соответствующими методами.

Третья глава посвящена разработке комплексной методики оценки параметров трещиноватости с учетом разработанных подходов по адаптации известных методик под условия рассматриваемых залежей, а

также оценке достоверности получаемых результатов. Выполненные исследования позволили рекомендовать следующий алгоритм оценки параметров трещиноватости по данным ГДИ при неустановившихся режимах:

Этап 1. Определение пластового давления методом произведения.

Этап 2. Диагностика режимов течения: оценка наличия на КВД участка, соответствующего радиальной фильтрации.

Этап 3. Диагностика режимов течения. Качественная и количественная оценка наличия на КВД точки перегиба и соответствия вида графика модели Уоррена-Рута.

Этап 4. Определение проницаемости матрицы по стандартным подходам (при наличии участка радиальной фильтрации) или методам с учетом послепритока (при отсутствии радиального участка).

Этап 5. При установлении соответствия анализируемой КВД модели Уоррена-Рута выполняется обработка по приведенному в [4, 8] алгоритму с определением средней проницаемости системы «матрица + трещины» и относительной емкости трещин. Проницаемость трещин определяется по формуле:

$$k_{\text{трещ}} = \frac{k_{\text{м+тр}}^2}{k_{\text{матр}}}; \quad (1)$$

где $k_{\text{м+тр}}$ – проницаемость системы «матрица + трещины»; $k_{\text{матр}}$ – определенная по ГДИ проницаемость поровой части коллектора.

Этап 6. Оценка средней текущей раскрытости трещин по формуле:

$$W_{\text{тек}} = \sqrt{\frac{k_{\text{трещ}}}{33 \cdot \omega \cdot K_{\text{п}}}}, \quad (2)$$

где ω – определенная ранее относительная емкость трещин; $K_{\text{п}}$ – коэффициент пористости.

Применимость использования разработанной методики оценена на основе комплексного анализа сходимости ее прогнозных результатов с фактическими промысловыми характеристиками эксплуатации скважин. Рассмотрена достоверность оценки проницаемости коллекторов по стандартному методу касательной ($k_{\text{МК}}$) и методу Уоррена-Рута ($k_{\text{У-Р}}$) раздельно для порового и трещинного типа коллектора. Наличие трещин оценивалось по разработанной выше комплексной методике. В результате 34 интервала добычи нефти отнесены к поровому типу, для 99 интервалов сделан вывод о наличии трещиноватости коллекторов. Для этих же интервалов добычи проведено сравнение средних величин удельной продуктивности скважин в поровом и трещиноватом коллекторах.

Сопоставление значений проницаемости по методам касательной и Уоррена-Рута для турне-фаменских коллекторов Соликамской депрессии

показывает их значимые различия, главным образом в условиях развития трещинных коллекторов. При интерпретации КВД по методу касательной для коллекторов порового типа в целом значения проницаемости контролируют удельную продуктивность скважин. Для коллекторов трещинного типа корреляционная связь заметно слабеет. Снижение контроля метода касательной продуктивности скважин проявляется более сильно для коллекторов трещинного типа при анализе в пределах конкретных месторождений.

При использовании модели Уоррена-Рута при интерпретации КВД расчетная проницаемость в условиях трещиноватого коллектора хорошо согласуется с удельной продуктивностью скважин. Усиление контроля методом Уоррена-Рута проявляется более сильно при анализе в пределах конкретных месторождений.

Проведенный статистический анализ показывает, что в условиях коллекторов трещинного типа результаты расчетов проницаемости по разработанной методике значительно лучше сопоставимы с промысловыми характеристиками работы скважин. Использование при оценке проницаемости метода касательной приводит к занижению реальной проницаемости коллекторов трещинного типа и не может быть рекомендовано в условиях трещинного коллектора.

В четвертой главе приведены примеры решения прикладных задач с помощью разработанной методики.

Использование результатов для изучения особенностей геологического строения залежей и прогнозирования распространения коллекторов трещинно-порового типа.

В работе [1] автором для изучения геологического строения фаменской залежи Озерного месторождения привлечены материалы исследований 55 скважин, пробуренных в начальный период разработки. Все КВД обработаны с применением разработанной методики, для каждой из скважин диагностирован тип коллектора. В результате для 20 скважин по КВД, обработанным в соответствии с моделью Уоррена-Рута, сделаны выводы о наличии трещинных коллекторов. Для 32 скважин установлен монотонно затухающий темп восстановления давления, что соответствует коллектору порового типа. В 3 случаях получены неоднозначные результаты о типе коллектора.

По результатам обработки построена схема, отражающая расположение зон развития трещиноватости на площади фаменской залежи Озерного месторождения (рис.3). При ее построении учитывались данные на начальный период эксплуатации скважин, с целью охарактеризовать естественное геологическое строение залежи без влияния последующих геолого-технических мероприятий. Из схемы видно, что распределение

скважин по площади имеет зональный характер. Скважины, где по методике Уоррена-Рута прогнозируется трещинный коллектор, образуют зону, направленную с юго-запада на северо-восток (рис. 3).

С целью выявления геологических закономерностей размещения зон трещиноватости полученные результаты сопоставлены с уточненной литолого-фациальной моделью фаменской залежи Озерного месторождения, построенной на основе комплексирования данных керна и 3D сейсморазведки [Путилов, 2014]. В указанной работе И.С. Путиловым выделены 4 литолого-фациальные зоны: нижнего тылового шлейфа (класс 1), верхнего тылового шлейфа (класс 2), биогермного ядра (класс 3), склона рифа (класс 4). С учетом данной классификации в диссертации проведено статистическое сопоставление приуроченности развития трещинных коллекторов к различным литолого-фациальным зонам.

В результате средние значения класса литолого-фациальной зоны соответственно составили:

$I_{\text{п}} = 2,7 \pm 0,6$ – для поровых коллекторов;

$I_{\text{п}} = 1,4 \pm 0,8$ – для трещинных коллекторов.

В данном случае по показателю $I_{\text{п}}$ гипотезы о равенстве средних при распределении t -Стьюдента и однородности выборки по статистике χ^2_p для поровых и трещинных коллекторов можно принять лишь на уровне значимости менее 0,001%, что подтверждает зональность процессов развития трещиноватости. Анализ приведенных на рисунке 3 данных показывает, что трещинный тип коллектора развит в литолого-фациальной зоне верхнего тылового шлейфа и прилегающих к ней участков. Поровый тип коллектора приурочен к литолого-фациальным зонам биогермного ядра, нижней части тылового шлейфа и рифового склона.

Апробация результатов определения параметров трещиноватости в соответствии с разработанной методикой выполнена с привлечением значительного объема геолого-промысловых данных (эффективная нефтенасыщенная толщина пласта $h_{\text{н}}$; глубина кровли $H_{\text{кр}}$; начальный дебит жидкости $Q_{\text{жидк}}$; начальный коэффициент продуктивности $K_{\text{прод}}$; средняя проницаемость зон дренирования пласта k) по 55 скважинам, эксплуатирующим фаменскую залежь Озерного месторождения.

Необходимо отметить, что размещение скважин по площади фаменской залежи является практически равномерным, что подтверждается данными приведенными в работе [11]. Равномерная разбуренность позволяет утверждать, что установленные по площади залежи особенности распределения трещинных коллекторов не будут являться случайными.

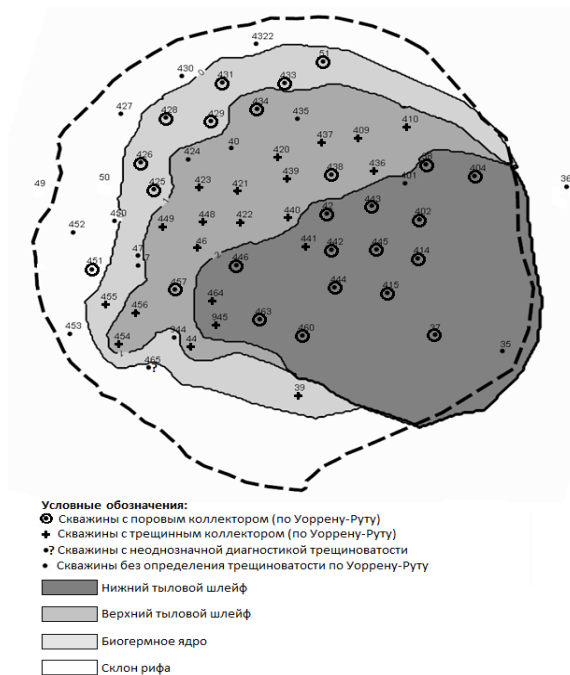


Рис. 3. Схема фаменной залежи нефти Озерного месторождения с выделением литолого-фациальных зон и результатами принадлежности скважин к поровому или трещинному типу коллектора

Статистические характеристики геолого-промысловых показателей раздельно для поровых и трещинных коллекторов приведены в таблице 1.

Из представленных данных видно, что по показателю h_n , который характеризует толщины выделенных по ГИС поровых коллекторов, не установлено значимых различий. Между тем, трещинные коллекторы в целом приурочены к повышенным участкам рельефа. Гипотезу о равенстве средних при распределении t -Стюдента для параметра $H_{кр}$ можно принять лишь на уровне значимости 0,8%, по статистике χ^2_p – на уровне менее 2%. Установленные значимые различия в абсолютных отметках рельефа для коллекторов порового и трещинного типа свидетельствуют о различных геологических условиях формирования коллекторов разного типа пустотности.

Существенные различия для поровых и трещинных коллекторов установлены также для показателя $Q_{жидк}$. Из таблицы 1 видно, что начальные дебиты жидкости в трещинных коллекторах существенно

превышают величины для коллекторов порового типа. Гипотезу о равенстве средних при распределении t -Стьюдента можно принять на уровне значимости менее 7%. Для показателей $K_{\text{прод}}$ и k также наблюдается некоторое превышение величин в трещинном типе коллектора, однако различия в данном случае носят менее значительный характер.

Таблица 1

Статистические характеристики геолого-промысловых показателей для поровых и трещинных коллекторов фаменской залежи Озерного месторождения

Показатель	среднее значение и стандартное отклонение		статистические критерии	
	трещинный коллектор	поровый коллектор	$\frac{t}{p}$	$\frac{-\chi^2_p}{p}$
$h_{\text{н}}, \text{ м}$	24,1±12,1	22,7±14,9	$\frac{0,402}{0,690}$	$\frac{0,563}{0,755}$
$H_{\text{кр}}, \text{ м}$	-1588±10,9	-1601±20,3	$\frac{2,75}{0,008}$	$\frac{8,31}{0,016}$
$Q_{\text{жидк}}, \text{ м}^3/\text{сут}$	28,2±26,1	17,9±17,1	$\frac{1,87}{0,067}$	$\frac{2,82}{0,243}$
$K_{\text{прод}}, \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{МПа})$	13,1±15,6	10,6±13,5	$\frac{0,65}{0,517}$	$\frac{0,40}{0,820}$
$k, \text{ мД}$	76,3±165,1	30,5±99,7	$\frac{1,35}{0,181}$	$\frac{1,54}{0,464}$

Использование результатов для повышения достоверности геолого-гидродинамического моделирования.

В работах [8, 9] установлено, что при адаптации истории работы скважин фаменской залежи Озерного месторождения неучет трещиноватости приводит к невозможности адекватного воспроизведения истории работы значительной доли добывающего фонда. При этом рассмотрены возможные подходы к учету работы интервалов трещинных коллекторов при создании геолого-гидродинамической модели (ГДМ). На первом этапе для скважин, находящихся в зоне развития трещиноватости, выполнена модификация значений проницаемости, основанная на данных обработки КВД в соответствии с предложенной методикой. Реализованный подход – модификация проницаемости с учетом результатов обработки данных ГДИ по предложенной методике, позволил повысить степень адаптации гидродинамической модели, но не решить проблему полностью, поскольку отклонения между рассчитанными в модели и историческими

показателями оставались. Поэтому далее в ГДМ между интервалами смоделирована проницаемая трещина с нулевой пористостью. Проницаемость при этом принята сопоставимой с проницаемостью выделенных нефтенасыщенных пропластков (рис. 4). В сравнение с моделью добычи нефти только из коллекторов порового типа (рис. 4.а) при учете также интервалов трещинных коллекторов (рис. 4.б) толщина работающих интервалов в ГДМ существенно увеличивается, что более достоверно отражает реальные геологические условия залежи.

Реализованный в диссертации подход к созданию ГДМ в зоне развития трещинных коллекторов, основанный на модификации проницаемости в комплексе с искусственным введением сообщаемости между поровыми коллекторами, позволил добиться на всем временном периоде адаптации высокой сходимости модельных и фактических значений по добыче нефти (рис. 5).

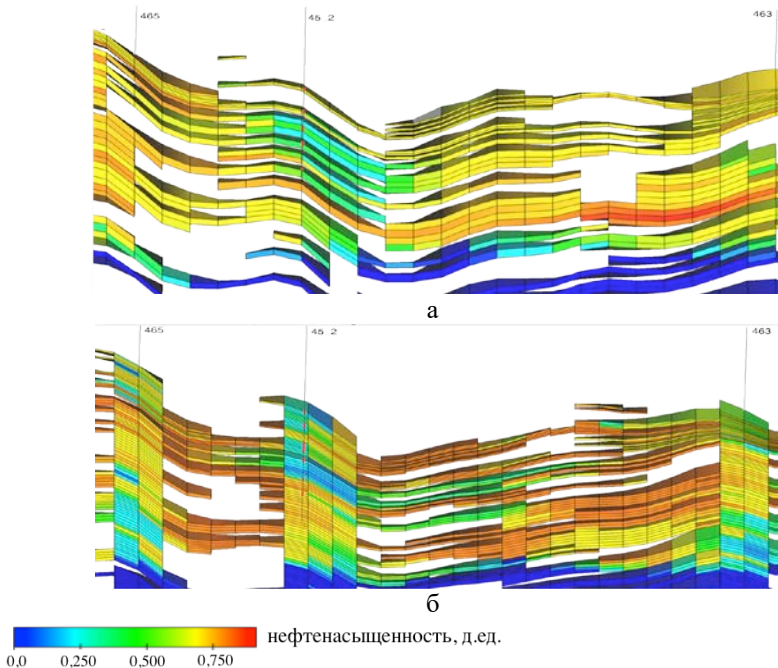


Рис. 4. Схематизация геологического разреза в районе скважины 45_2 с учетом порового коллектора (а) и с моделированием трещинной проницаемости

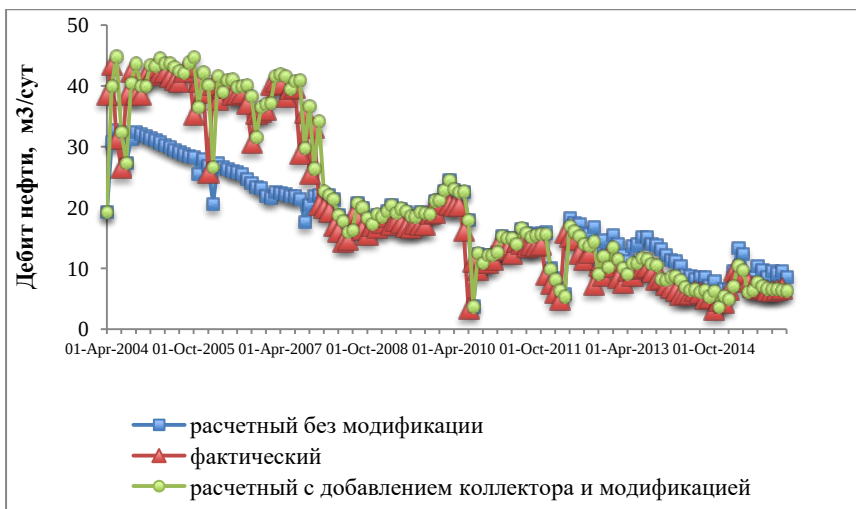


Рис. 5. Сопоставление фактических и расчетных дебитов нефти по скважине 45_2 для ГДМ на основе модели порового коллектора и с моделированием трещинной проницаемости

Аналогичный результат высокой сходимости фактических и модельных результатов также получен при выполнении адаптации для показателей добычи жидкости и забойного давления. Данный подход реализован для воспроизведения истории работы по 22-м скважинам фаменской залежи Озерного месторождения. Во всех случаях это привело к повышению степени адаптации показателей разработки скважин, что повысило достоверность ГДМ для залежи в целом.

Основные результаты исследований

Основные выводы проведенного диссертационного исследования сводятся к следующему:

1. Установлено, что проведение геофизических исследований скважин и изучение керна методом шлифов не позволяют в полной мере оценить факт наличия трещиноватости коллектора и определить численные характеристики трещин, особенно в условиях низкой освещенности кернавым материалом.

2. Обосновано, что достоверным методом диагностики трещиноватости и оценки ее характеристик являются гидродинамические исследования методом восстановления давления (уровня) обработанные с применением модели Уоррена-Рута.

3. Разработана и апробирована в условиях карбонатных коллекторов турне-фаменских залежей нефти Соликамской депрессии методика комплексной обработки данных гидродинамических исследований скважин при неустановившихся режимах, основанная на модели Уоррена-Рута.

4. Выполненные расчеты по данной методике позволили построить схему распределения трещиноватости и прогнозировать пространственное распространение коллекторов различного типа.

5. Данные о пространственном развитии зон трещиноватости коллекторов могут быть использованы при анализе разработки залежей нефти, в том числе при выполнении геолого-гидродинамического моделирования.

Список опубликованных работ по теме диссертации Издания, рекомендованные ВАК

- 1 Черепанов С.С., Пономарева И.Н., Ерофеев А.А., Галкин С.В. Определение параметров трещиноватости пород на основе комплексного анализа данных изучения керна, гидродинамических и геофизических исследований скважин // М.: Нефтяное хозяйство, 2014, № 2, с. 94-96.
- 2 Черепанов С.С., Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н., Хижняк Г.П. Оценка анизотропии проницаемости карбонатных коллекторов по кривым восстановления давления// М.: Нефтяное хозяйство. 2013, № 4, с. 60-61.
- 3 Черепанов С.С., Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н. Оценка фильтрационно-емкостных свойств трещиноватых карбонатных коллекторов месторождений Предуральяского краевого прогиба. М.: Нефтяное хозяйство, 2013, № 3, с. 62-65.
- 4 Неганов В.М., Черепанов С.С., Шумилов А.В., Шумский И.Ф. Крупное открытие геофизиков и нефтяников Пермского края начала XXI века. М.: Геофизика, 2013, № 5. с. 26-31.
- 5 Черепанов С.С., Пономарева И.Н., Чумаков Г.Н., Ильчибаев А.А. Сравнительная характеристика методов обработки КВД скважин газовых месторождений ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани». М.: Нефть, газ и бизнес, 2013, № 5, с. 48-52.
- 6 Рошмаков Ю.В., Столбова Т.А., Лаптев А.П., Неганов В.М., Черепанов С.С., Ланцев В.Ф. Технологии сейсморазведки при подготовке объектов в транзитных зонах. Технологии сейсморазведки. 2010, № 2, с. 85-89.
- 7 Черепанов С.С., Чумаков Г.Н., Галкин С.В. Возможности учета трещиноватости коллекторов при геолого-гидродинамическом моделировании разработки залежей с заводнением пластов. М.: Нефтепромысловое дело, № 8, 2016, с.5-8.

- 8 Galkin S.V., Efimov A.A., Krivoshchekov S.N., Savitskiy Ya.V., Cherepanov S.S. X-ray tomography in petrophysical studies of core samples from oil and gas fields // Russian Geology and Geophysics - 2015. - №5. - P.782-792.

Прочие издания

- 1 Черепанов С.С. Комплексное изучение трещиноватости карбонатных залежей методом Уоррена-Рута с использованием данных сейсмофациального анализа (на примере турне-фаменской залежи Озерного месторождения). Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. № 14. С. 6-12.
- 2 Черепанов С.С. Комплексное использование керна и методов обработки данных гидродинамических исследований при оценке параметров трещиноватости. М.: Альманах мировой науки. Развитие науки и образования в современном мире: по материалам Международной научно-практической конференции, № 1 – 1 (4), 2016, с. 59-64.
- 3 Галкин В.И., Пономарева И.Н., Черепанов С.С. Разработка методики оценки возможностей выделения типов коллекторов по данным кривых восстановления давления (КВД) по геолого-промысловым характеристикам пласта (на примере фаменской залежи Озерного месторождения). Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело, 2015, № 17. с. 32-40.