

На правах рукописи

САЛЬНИКОВА ОЛЬГА ЛЕОНИДОВНА

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ИХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ**

1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и
газовых месторождений

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный консультант: **Черных Ирина Александровна,**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Валиуллин Рим Абдуллович,**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (г. Уфа)
Вольпин Сергей Григорьевич,
кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела гидродинамических исследований и моделирования ФГУ «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук» (г. Москва)

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»** (г. Ижевск)

Защита диссертации состоится 04 июня 2024 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.15 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, ауд.345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан 12 марта 2024 г.

Ученый секретарь,
кандидат технических наук, доцент

Мелехин А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Значительная доля разрабатываемых в настоящее время залежей нефти и газа характеризуется сложным геологическим строением, низкой проницаемостью, сложной и неравномерно распределенной пустотностью. В таких условиях поддержание рентабельных объемов добычи флюидов достигается во многом благодаря реализации сложных систем разработки, в том числе предусматривающих применение скважин со сложной конструкцией ствола. На территории Пермского края в промышленной разработке находится ряд объектов, действующий эксплуатационный фонд которых представлен скважинами с горизонтальным окончанием ствола (горизонтальными скважинами). Специфическая конструкция ствола горизонтальных скважин (ГС) обуславливает необходимость применения уникальных технологий не только их строительства, но и дальнейшей эксплуатации, в том числе проведения геофизических (ГИС) и гидродинамических (ГДИ) исследований. Проблематику исследований горизонтальных скважин можно разделить на два ключевых направления – технико-технологическое и методологическое (интерпретационное). Техничко-технологические задачи проведения исследований ГС в настоящее время решаются довольно успешно за счет применения специальных компоновок, обеспечивающих либо каротаж в процессе бурения (LWD), либо исследования в пробуренном стволе (ТК «Латераль» и др.). Проблема адаптации методологии интерпретации исследований для специфических условий ГС решена не в полной мере, что обуславливает актуальность проблематики настоящего диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования.

Проблемы решения прямой (моделирование притока) и обратной (определение свойств пласта при исследованиях) задач подземной гидромеханики применительно к скважинам с горизонтальным окончанием ствола рассмотрены в научных работах российских и зарубежных специалистов: Ю. П. Борисова, Н. Н. Михайлова, Р. Д. Каневской, С.И. Грачева, С. К. Сохошко, А. В. Стрекалова,

З. С. Алиева, Р. А. Валиуллина, В. А. Иктисанова,
М. И. Кременецкого, А. И. Ипатова, В.Л. Сергеева,
В. Г. Григулецкого, G. Renard, J. Dupuy, S. Joshi, F. Giger и др.
Разработанные уравнения притока жидкости к горизонтальным скважинам являются аналитическими, что обеспечивает их универсальность, при этом многочисленные исследования демонстрируют их невысокую прогностическую способность применительно к фактическим условиям сложнопостроенных карбонатных коллекторов. Проблематика исследований горизонтальных скважин в достаточно большом объеме рассмотрена в контексте решения технико-технологических задач, таких как доставка измерительных приборов, их адаптация к конструкции ствола и т.п. При этом вопросы совершенствования методологии интерпретации результатов выполненных измерений в условиях сложнопостроенных карбонатных коллекторов рассмотрены в недостаточной степени.

Целью работы является разработка комплексного подхода к достоверному определению фильтрационных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов и дебитов горизонтальных скважин.

В соответствии с целью работы сформулированы следующие **основные задачи исследования**:

1. Выявление перспективных направлений совершенствования технологий проведения и методик интерпретации материалов исследования горизонтальных скважин на основе анализа научно-технической литературы, посвященной определению фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов.

2. Анализ и совершенствование технологического комплекса проведения исследований ГС.

3. Совершенствование способов интерпретации ГДИ ГС. Оценка достоверности определения гидродинамических характеристик коллекторов.

4. Сравнительный анализ и совершенствование методов прогнозирования притока жидкости к ГС.

Объект исследования – залежи нефти месторождений Пермского края, приуроченные к карбонатным коллекторам, которые эксплуатируются горизонтальными скважинами.

Предмет исследования – гидродинамические характеристики продуктивных пластов, вскрытых горизонтальными скважинами.

Научная новизна и теоретическая значимость выполненной работы представлена следующими положениями:

1. Обоснована достоверность скважинной барометрии при оценке пространственного размещения горизонтального участка ствола.

2. Впервые предложен способ интерпретации кривых восстановления давления горизонтальных скважин, осложненных проявлением «концевых» эффектов, который предусматривает дополнительную обработку КВД графоаналитическим методом произведения.

3. Установлено дифференцированное влияние отношения (анизотропии) проницаемости на условия притока жидкости к горизонтальным скважинам в сложнопостроенных карбонатных коллекторах.

4. Доказано, что разработанные многомерные статистические модели описывают приток жидкости к горизонтальным скважинам в сложнопостроенных карбонатных коллекторах с существенно более высокой достоверностью по сравнению с известными аналитическими решениями.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Включение барометрии в комплекс технологий проведения исследований позволяет в значительной мере корректировать пространственное размещение горизонтального участка ствола скважины.

2. Предложенный усовершенствованный способ интерпретации кривых восстановления давления позволяет повысить достоверность определения фильтрационных свойств сложнопостроенных карбонатных коллекторов, эксплуатирующихся горизонтальными скважинами.

Результаты диссертационного исследования используются при геологическом контроле за разработкой нефтяных месторождений, разрабатываемых горизонтальными скважинами (Акт внедрения ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»).

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0005).

Методология и методы исследования.

Экспертный анализ научных литературных источников по проблеме достоверного определения гидродинамических характеристик сложнопостроенных карбонатных коллекторов, эксплуатирующихся горизонтальными скважинами; современные методы и программные продукты для интерпретации материалов геофизических и гидродинамических исследований скважин; методы математической статистики, в том числе множественный регрессионный анализ, корректность применения которых подтверждена высокой степенью сходимости с фактическими промысловыми данными.

Положения, выносимые на защиту:

1. Дополнительная обработка КВД графоаналитическим методом произведения позволяет снизить неопределенность выбора интерпретационных моделей и повысить достоверность определения фильтрационных свойств коллекторов.

2. Анизотропия проницаемости карбонатного коллектора оказывает дифференцированное влияние на условия притока жидкости к горизонтальным скважинам.

3. Разработанная многомерная статистическая модель дебита горизонтальных скважин характеризуется более высокой прогностической способностью по сравнению с известными аналитическими решениями.

Достоверность результатов практического применения предложенного способа интерпретации кривых восстановления давления горизонтальных скважин подтверждена высокими статистическими оценками многомерных моделей дебитов горизонтальных скважин, включающих вычисленные таким образом гидродинамические характеристики коллекторов.

Апробация результатов исследований

Основное содержание работы представлялось на конференции «XII Уральская молодежная научная школа по геофизике» (г. Пермь, 2011 г.); научно-практической конференции «Новая техника и технологии для геофизических исследований скважин» (г. Уфа, 2011 г.); XII Российско-Китайский научном симпозиуме «Новая техника и технологии в нефтегазовой промышленности» (г. Иркутск, 2012 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Развитие геофизических методов с позиций первой всесоюзной геофизической конференции» (г. Пермь, 2012 г.); XI международном симпозиуме «Новая техника и технологии ГИС для нефтегазовой промышленности» (г. Новосибирск, 2019 г.), на международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (г. Пермь, 2019 г.); IX международной научно-практической конференции «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» (г. Пермь, 2015–2021 гг.).

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 6 научных работах, опубликованных в ведущих рецензируемых научных изданиях, в том числе 2 работы опубликовано в изданиях, входящих в международные базы цитирования (Scopus и Web of Science).

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 117 наименований, приложения. Работа изложена на 113 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, его цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

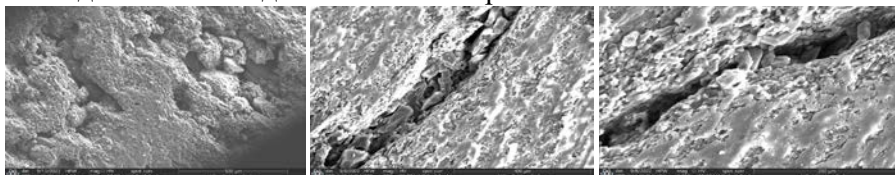
Первая глава посвящена аналитическому обзору методов определения фильтрационных свойств продуктивных пластов при их эксплуатации ГС. В условиях отсутствия технической возможности отбора керн при реализуемых в Пермском крае

технологиях строительства ГС возрастает роль косвенных методов определения фильтрационных свойств коллекторов, а именно геофизических (ГИС) и гидродинамических (ГДИ) исследований скважин.

Во **второй главе** диссертации обоснован выбор объекта исследования, в качестве которого рассматриваются турнейско-фаменские залежи нефти – рифовые массивы месторождений Соликамской депрессии. Актуальность решения поставленных задач применительно к данным залежам обусловлена, во-первых, сложным строением пустотного пространства карбонатного коллектора, во-вторых – реализованными системами разработки, включающими значительную долю ГС в общем эксплуатационном фонде, а также значительный опыт проведения различных технологий их исследования.

Для изучения особенностей строения пустотного пространства рассматриваемых коллекторов выполнены лабораторные исследования образцов керна, отобранных из вертикальных скважин указанных залежей. При этом выполнено литолого-петрофизическое описание образцов керна и шлифов, в том числе с применением сканирующей электронной микроскопии. Анализ результатов выполненных исследований продемонстрировал сложную структуру пустотного пространства, характеризующуюся, в том числе, наличием системы каверн, залеченных, частично залеченных и открытых трещин (рис.1).

Установленные в ходе исследования керна особенности строения пустотного пространства являются факторами, осложняющими проведение и интерпретацию материалов исследований ГС в данных коллекторах.



а) поры, каверны

б) залеченные трещины

в) частично залеченные трещины

Рис.1. Типы пустотного пространства, характерные для турнейско-фаменских коллекторов

Третья глава посвящена обобщению опыта проведения и интерпретации данных геофизических и гидродинамических исследований ГС, эксплуатирующих турнейско-фаменские отложения месторождений Соликамской депрессии.

Аспекты проведения ГИС в ГС можно разделить на технико-технологические и методологические (интерпретационные).

Технологии проведения ГИС в ГС можно разделить на две группы: каротаж в процессе бурения (LWD) и использование зондов с применением специальных комплексов их доставки (ТК «Латераль» и т.п.). При этом технологии LWD считаются предпочтительными, поскольку обеспечивают не только оперативное измерение геофизических полей, но и контроль за положением траектории скважины в пространстве. Выполненный в диссертационной работе анализ продемонстрировал недостаточную достоверность материалов LWD. В настоящей работе предложен способ оперативного контроля траектории ГС посредством данных фоновый замера барометрии, что продемонстрировано на рис.2.

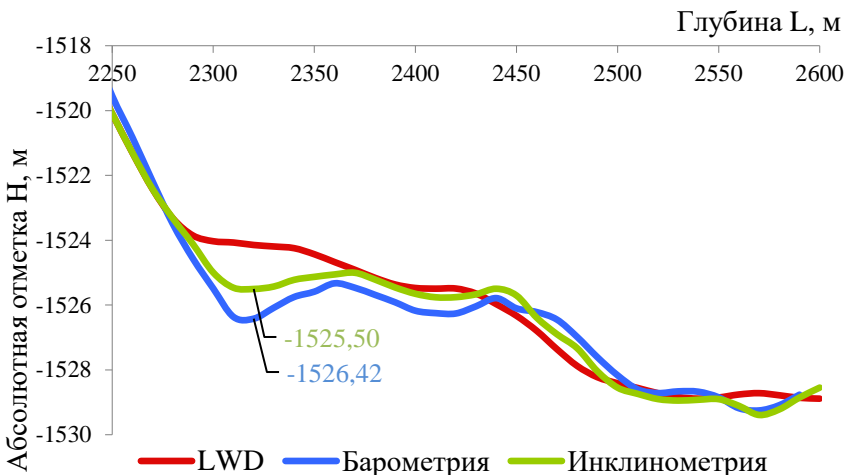


Рис.2. Иллюстрация способа уточнения траектории ствола горизонтальной скважины (выкопировка из планшета ГИС)

Из рис.2 следует, что траектория ствола скважины, построенная по данным барометрии, отличается от результатов

LWD. При этом результаты барометрии подтверждены проведенными в дальнейшем специальными исследованиями (инклинометрией). Аналогичные результаты получены в условиях нескольких ГС региона. Для оценки различий трех рассматриваемых методик оценки пространственной ориентации ГС выполнены детальные статистические исследования (приведены в тексте диссертации).

Статистические расчеты подтверждают преимущественную информативность барометрии по сравнению с LWD в рассматриваемых условиях. Также установлено, что максимально достоверные оценки пространственной ориентации ГС достигаются при комплексном использовании технологий, что может быть достигнуто при включении барометрии в комплекс методов ГИС. Подтверждением данного вывода является построенная статистическая модель прогноза пространственной ориентации горизонтального ствола (H^M), комплексно учитывающая горизонтальную (L) и вертикальные (H^{LWD} и $H^{Бар}$) координаты горизонтального участка в пределах продуктивного пласта, которая имеет вид:

$$H^M = 0,759H^{Бар} + 0,314H^{LWD} + 0,0012L + 110,01 \quad (1)$$

Статистические оценки модели (коэффициент детерминации $R=0,994$, уровень значимости $p < 0,0001$) свидетельствуют об ее статистической значимости.

Независимо от технологии проведения измерений, интерпретация материалов ГИС ГС проводится по алгоритмам, разработанным для условно вертикальных скважин. Горную породу дифференцируют на коллектор/неколлектор посредством сопоставления пористости с граничным значением, обоснованным при подсчете запасов. В свою очередь, при обосновании граничного значения пористости не учитывается специфика течения флюида к ГС. В ходе выполненного в работе анализа установлено, что использование описанного способа дифференциации горных пород на коллектор/неколлектор приводит к результирующей невысокой доле коллектора на протяжении горизонтального участка ствола. Так, для Шершневского месторождения доля коллектора изменяется от 5

до 33 %, в среднем составляя 19,5 %. Однако впоследствии скважины вводятся в эксплуатацию с фактическими дебитами, соответствующими/превышающими плановые значения, рассчитанные без учета низкой доли коллектора.

В результате распространенной является ситуация, когда интервал, выделенный в ходе первичного каротажа как неколлектор, в процессе освоения обеспечивает приток пластового флюида, что продемонстрировано на рис. 3. По данным ГИС установлена протяженность коллектора, равная 52 м при общей длине горизонтального участка 220 м. В ходе первого этапа освоения получен приток из 111 м, заключительный (второй) этап освоения обеспечил приток из 145 м горизонтальной части ствола.

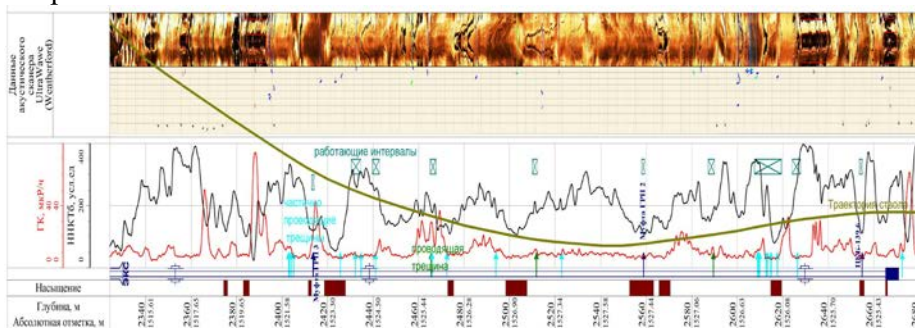


Рис. 3. Выкопировка из каротажной диаграммы ГС

Одной из проблем геофизических исследований в карбонатных коллекторах, независимо от конструкции ствола скважины, является определение проницаемости. Низкая достоверность пересчета пористости в проницаемость с использованием петрофизической зависимости обозначена в многочисленных научных источниках. Особую актуальность проблема приобретает в связи с отсутствием технологии отбора керна (основы построения петрофизической зависимости) при строительстве горизонтальных скважин в Пермском крае.

В условиях невысокой достоверности ГИС как метода определения фильтрационных свойств (проницаемости), возрастает роль другого косвенного метода их определения –

гидродинамических исследований. Наиболее распространенным и информативным методом ГДИ являются исследования методом восстановления давления (КВД), которые на рассматриваемых объектах проводятся регулярно. Возрастающая доля ГС в общем эксплуатационном фонде обуславливает необходимость адаптации алгоритмов интерпретации КВД под специфику соответствующей геометрии течения. В настоящее время в мировой практике нефтяной геологии широкое распространение получил математический аппарат, основанный на анализе производной давления (теория Bourdet) и реализованный в современных программных продуктах. Их функционал позволяет выполнять интерпретацию КВД и определять комплекс гидродинамических характеристик, специфических для системы «продуктивный пласт – горизонтальная скважина». Основанием для выбора интерпретационной модели «горизонтальная скважина» предложено считать не сам факт наличия такой конструкции, а вид графика в диагностических координатах, представленный на рис.4(а).

В ходе выполненного анализа установлено, что вид графика КВД может отличаться от представленного на рис.4 (а), в связи с совместным влиянием сложного строения пустотного пространства и граничных эффектов на процесс восстановления давления, что графически отражено на рис. 4(б).

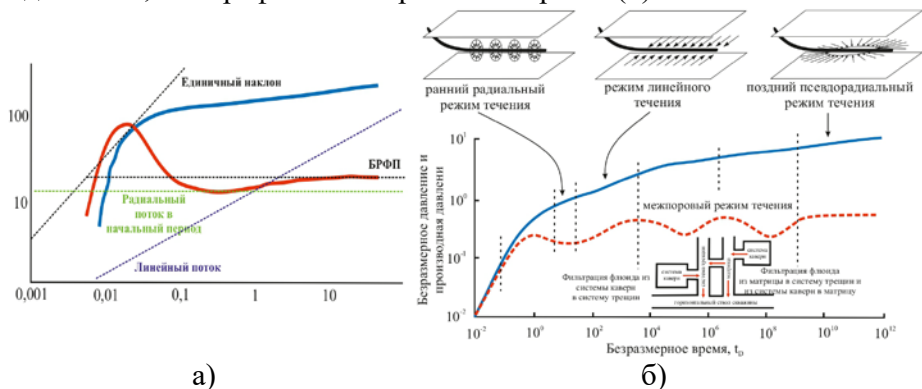


Рис.4. Графики КВД в условиях сложной геометрии притока жидкости к горизонтальным скважинам

Анализ всех ($n=50$) материалов исследования ГС Шершневого месторождения позволил установить, что только в 5% случаев график имеет характерный вид, соответствующий рис. 4(а). Как следствие, обработка только этих КВД выполнена с применением модели «горизонтальная скважина» с получением специфических гидродинамических параметров (работающая длина ствола, анизотропия проницаемости). В качестве примера на рис.5 приведена КВД скв.407. Несмотря на высокую продолжительность исследования (20 суток), заключительный отрезок КВД характеризуется отрицательной динамикой производной давления, что относят к граничным эффектам.

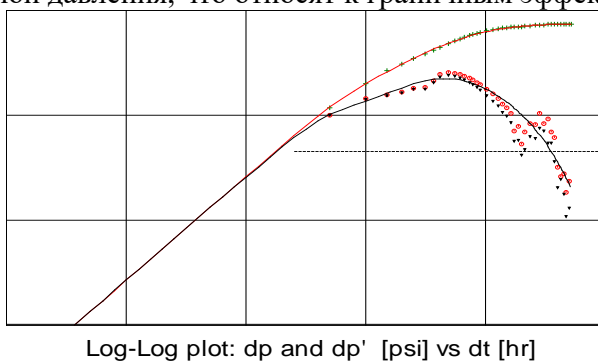


Рис.5. Кривая восстановления давления горизонтальной скв.407

Установлено, что значительное количество КВД ГС интерпретировано с применением модели «вертикальная скважина». Анализ данного способа (в полном объеме приведен в тексте диссертации), основанный на исследовании корреляции между удельной продуктивностью скважин и вычисленной проницаемостью, показал его невысокую достоверность. Полученный вывод свидетельствует о нецелесообразности использования моделей, не учитывающих наличие горизонтального участка ствола, при определении фильтрационных параметров пластов.

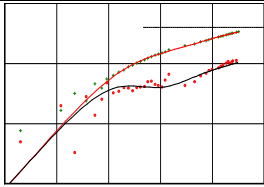
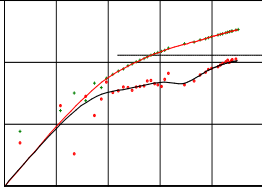
Таким образом установлено, что фактические графики КВД ГС в сложнопостроенных карбонатных коллекторах не соответствуют теории Bourdet, а применение модели «вертикальная скважина» приводит к получению недостоверных

параметров, что обуславливает необходимость совершенствования способов к интерпретации КВД, чему посвящена следующая глава диссертации.

Четвертая глава диссертации посвящена совершенствованию способов интерпретации материалов ГДИ ГС.

Как продемонстрировано ранее, интерпретация КВД ГС в соответствии с моделью «вертикальная скважина» приводит к получению недостоверных результатов. В этой связи предлагается выполнять интерпретацию с принудительным наложением интерпретационной модели «горизонтальная скважина». При наличии неопределенностей в выборе остальных характеристик интерпретационных моделей (модель пласта, ствола скважины, границ и т.п.) предлагается следующий способ. Известно, что основным принципом выбора комплексной интерпретационной модели является обеспечение наилучшего совмещения с фактической кривой восстановления давления, что оценивается специалистом на визуальном уровне. При этом зачастую разные модели обеспечивает одинаковую сходимость расчетных и фактических кривых, но с существенно различающимися результатами. В качестве примера в табл.1 приведены сравнительные результаты интерпретации КВД одной из скважин с применением двух различных моделей.

Таблица 1 – Сравнение результатов интерпретации КВД

Критерий	Модель 1	Модель 2
Визуальное совмещение	 Log-Log plot: dp and dp* [MPa] vs dt [min]	 Log-Log plot: dp and dp* [MPa] vs dt [min]
Проницаемость k, мД	14,1	71,7
Скин-фактор S, б/р	0,1	-5,9
Пластовое давление P _i , МПа	12,31	14,04
Пластовое давление (метод произведения)	12,41	

В обоих случаях в ходе интерпретации удалось добиться высокой степени совмещения кривых с применением принципиально различных инструментов. Для снижения неопределенностей при выборе моделей считается целесообразным сравнивать результаты интерпретации с данными, полученными принципиально другим путем. В этой связи предлагается интерпретацию КВД в программном продукте дополнять обработкой графоаналитическим методом произведения, что не является трудозатратным мероприятием, но позволяет довольно устойчиво определять величину пластового давления. Так, для рассматриваемой в примере скважины, величина пластового давления по методу произведения составляет 12,41 МПа, что соответствует результатам интерпретации с использованием модели 1.

Таким образом, дополнительная обработка КВД ГС методом произведения позволит оперативно устранить неопределенности при выборе интерпретационных моделей.

В ходе диссертационного исследования с использованием предложенного способа по снижению неопределенностей все КВД ГС интерпретированы с принудительным наложением соответствующей модели. При интерпретации рассчитан комплекс параметров, характеризующих гидродинамические свойства системы «пласт–горизонтальная скважина»: (латеральная проницаемость (k_r), отношение (анизотропия) проницаемости ($k_{r/z}$), полный ($S_{\text{полн}}^S$) и геометрический ($S_{\text{геом}}^S$) скин-факторы, работающая длина горизонтального ствола ($L_{\text{ГС}}^S$)). Числовые значения определенных параметров соответствуют существующим представлениям о геолого-физических свойствах залежи, за исключением величины $L_{\text{ГС}}^S$, которая, в ряде случаев, имеет значение, превышающее фактическую длину горизонтального участка ствола $L_{\text{ГС}}^{\text{факт}}$. Для изучения причин данного явления выполнен корреляционный анализ, результаты которого отражены на рис.6.

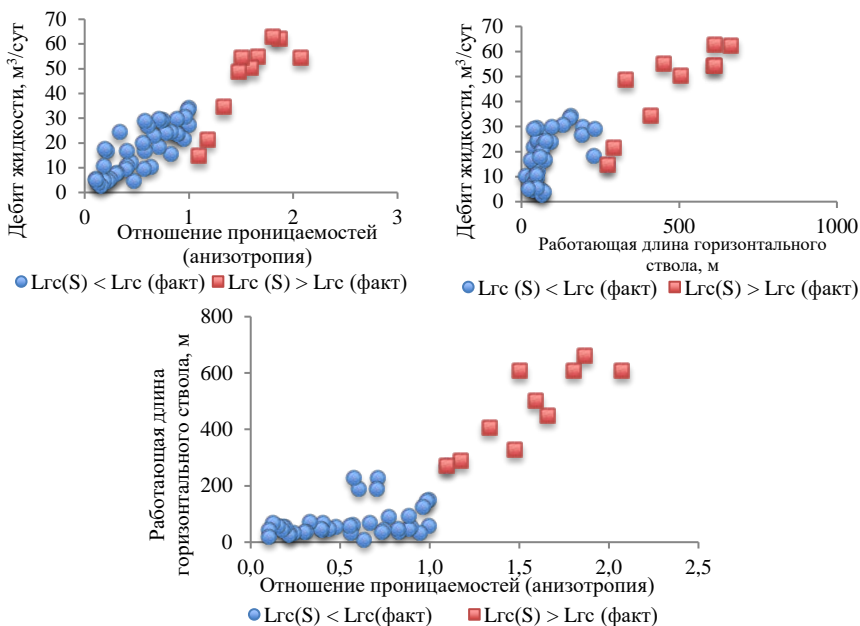


Рис. 6. Корреляционные поля между гидродинамическими параметрами

В ходе анализа установлена тесная связь между отношением (анизотропией) проницаемости, работающей длиной ствола и дебитом скважин. Из представленных на рис.6 данных следует, что зависимость между работающей длиной ГС и коэффициентом анизотропии проницаемости также довольно тесная, но имеет более сложный вид, различный при $k_{r/z} \approx 1,0$. То есть превалирование одной из составляющих проницаемости (вертикальной или латеральной) различным образом влияет на длину горизонтального участка, обеспечивающего приток жидкости. При превалировании латеральной проницаемости над ее вертикальной составляющей работающая длина горизонтального ствола $L_{ГС}^S$ превышает фактическое значение этого параметра, что, вероятно, обусловлено увеличением размеров зоны дренирования пласта скважиной в горизонтальной плоскости.

Дополнительная проверка достоверности определения гидродинамических параметров выполнена исходя из принципа

оценки их комплексного влияния на дебит скважин, которая, в свою очередь, основана на применении множественного регрессионного анализа. Результаты интерпретации дополнены геолого-технологическими показателями скважин: пластовое ($P_{пл}$) и забойное ($P_{заб}$) давления, толщина пласта (h), фактическая протяженность горизонтального участка ствола ($L_{гс}$), доля коллектора в пределах $L_{гс}$, определенная по данным ГИС ($D_{колл}$). Признаком достоверности определения параметра предлагается считать факт его включения в многомерную модель дебита при статистической значимости этих моделей.

Совместное (комплексное) влияние нескольких факторов на дебит ГС представлено в виде многомерного уравнения регрессии, которое имеет вид:

$$Q_{ж}^M = 16,49k_{r/z} + 0,03L_{ГС}^S - 0,79S_{полн}^S + 0,47P_{пл} - 0,09 \quad (2)$$

формирование результирующего коэффициента детерминации R происходит следующим образом: $0,904 \rightarrow 0,927 \rightarrow 0,941 \rightarrow \mathbf{0,944}$; коэффициент значимости $p < 0,0001$

Максимальный вклад в формирование дебита оказывает коэффициент анизотропии проницаемости, что свидетельствует о комплексном влиянии на процессы фильтрации обеих составляющих проницаемости и, как следствие, сферичности потока. Перечень остальных факторов, включенных в уравнение (2), также следует считать обоснованным и подчеркивающим правомерность предложенных выше способов по интерпретации материалов ГДИ ГС.

Уравнение (2) характеризуется высокими статистическими оценками, и в этой связи в следующей главе диссертационной работы выполнено сравнительное исследование прогностической способности разработанной модели притока и известных аналитических решений.

Пятая глава диссертации посвящена сравнительному изучению прогностических способностей различных уравнений притока жидкости к ГС в рассматриваемых условиях. Известные аналитические формулы притока жидкости включают в свой состав целый перечень параметров, практическое определение которых вызывает затруднения, в том числе длину главной оси

полуэллипса – зоны дренирования пласта, ширину пласта и радиус контура питания. Многомерная статистическая модель (2) включает в качестве исходных данных только те параметры, которые характеризуют фактическую эксплуатацию скважин и определяются без особых затруднений.

В ходе диссертационного исследования для всех данных, использованных при разработке многомерной статистической модели (2), рассчитаны значения дебита с использованием распространенных аналитических уравнений дебита горизонтальных скважин: Чарного, Борисова-Табакова, Григулецкого, Joshi (1), Joshi (2) с учетом анизотропии проницаемости, Giger, Renard-Dupuy. Прогностическая способность каждой формулы оценена при визуальном сопоставлении фактических и расчетных дебитов, а также при анализе соответствующих коэффициентов корреляции (рис.7).

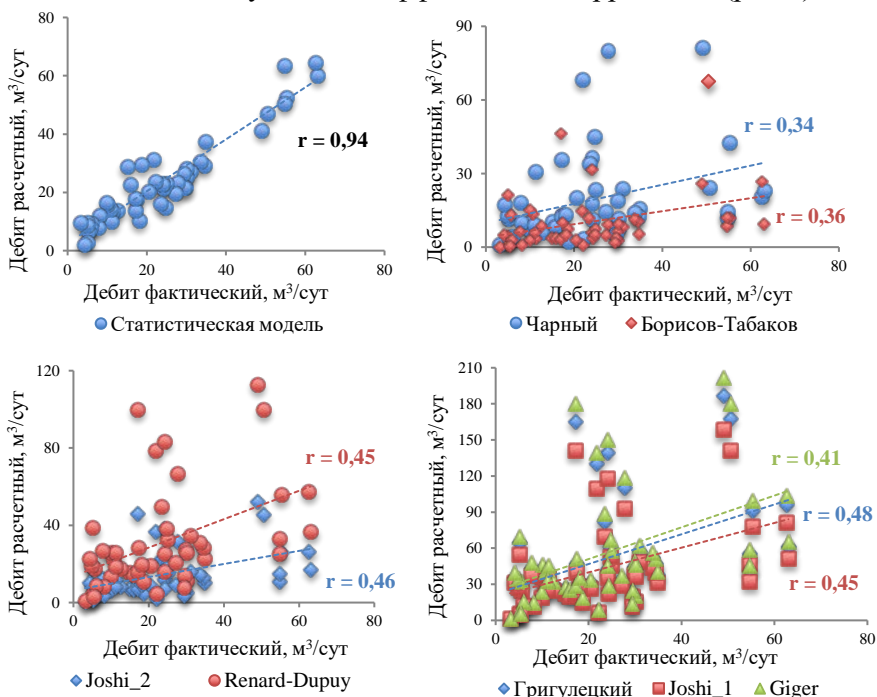


Рис. 7. Сопоставление расчетных и фактических дебитов ГС

Представленные на рис.7 данные демонстрируют существенно более высокую прогностическую способность полученной многомерной статистической модели по сравнению с известными аналитическими решениями при воспроизведении дебитов ГС в рассматриваемых условиях. Как следствие, многомерную статистическую модель целесообразно использовать не только как инструмент изучения условий формирования притока, но и для прогноза дебита жидкости к ГС (с учетом соблюдения требований к применимости многомерных статистических моделей). В случае если исходные данные не соответствуют диапазонам применимости модели, предлагается тиражирование использованного в диссертации способа и разработка аналогичных уравнений притока для других геолого-физических условий фильтрации.

Заключение

Таким образом, в ходе выполненного диссертационного исследования получены следующие выводы и результаты:

1. В условиях реализации безкерновых технологий строительства ГС в рассматриваемом регионе возрастает роль ГИС и ГДИ как инструмента определения ФЕС коллекторов. Проблематика достоверного определения ФЕС состоит из двух основных аспектов – технико-технологического и интерпретационного. При этом в настоящее время часть вопросов в пределах обоих аспектов остаются нерешенными. Как следствие, снижается достоверность прогнозирования притока жидкости к ГС.

2. Предложен способ достоверной оценки пространственной ориентации горизонтального участка ствола, основанный на интерпретации данных барометрии скважин. Его достоверность подтверждена результатами статистического анализа. Также установлено, что максимально достоверные оценки траектории ГС имеют место при комплексном использовании технологий LWD и барометрии.

3. Предложен способ интерпретации КВД ГС, минимизирующий риски неопределенности выбора интерпретационной модели. С использованием предложенного способа интерпретированы КВД всех горизонтальных скважин

рассматриваемого объекта, достоверность определенных при этом гидродинамических параметров подтверждена в ходе регрессионного анализа с построением многомерной статистической модели дебита. В ходе исследования построенной модели также установлены особенности процессов фильтрации в рассматриваемых условиях, которые заключаются в выраженном взаимном влиянии между анизотропией проницаемости, работающей длиной ГС и дебитом жидкости.

4. Высокие оценки разработанной многомерной статистической модели являются основанием ее применения не только для исследования процессов фильтрации в рассматриваемых условиях, но и для прогноза дебитов ГС. Сравнительный анализ модели с известными аналитическими решениями продемонстрировал ее преимущественную работоспособность в условиях рассматриваемого сложнопостроенного карбонатного объекта.

Предложенные решения позволяют достоверно определять комплекс гидродинамических характеристик карбонатных коллекторов при их эксплуатации горизонтальными скважинами и прогнозировать их дебиты с учетом индивидуальных геолого-физических особенностей процессов фильтрации в сложнопостроенных карбонатных коллекторах, что является одной из приоритетных задач нефтегазопромысловой геологии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Сальникова О. Л., Черных И. А., Мартюшев Д. А., Пономарева И. Н. Особенности определения фильтрационных параметров сложнопостроенных карбонатных коллекторов при их эксплуатации горизонтальными скважинами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – № 5. – С. 138–147. (**Web of Science, Scopus**, перечень ВАК).

2. Шумилов А.В., Костицын В.И., Савич А.Д., Сальникова О.Л., Шумский И.Ф., Будник Д.А. Технологии геофизических исследований бурящихся и эксплуатируемых горизонтальных скважин // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 2. – С. 48–52. (**Scopus**, перечень ВАК).

3. Черных В.И., Сальникова О.Л., Черных И.А., Еремеев Н.С. Определение коллекторских свойств продуктивных пластов, эксплуатирующихся горизонтальными и наклонно-направленными скважинами // Бурение и нефть. – 2022. – № 11. – С. 9–13. (перечень ВАК)

4. Сальникова О.Л., Черных И.А. Обоснование применения методов интерпретации гидродинамических исследований скважин с различной конструкцией забоя // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2022. – № 4(364). – С. 28–32. (перечень ВАК)

5. Горбачева А.П., Сальникова О.Л., Серкина А.В., Савич А.Д., Чухлов А.С. Повышение эффективности проведения ГИС за счет использования новых технологий и методов // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 70–80. (перечень ВАК)

6. Савич А.Д., Сальникова О.Л., Черных И.А. Планирование и проведение геофизических исследований для оценки эффективности бурения скважин со сложным профилем // Каротажник. – 2017. – № 10(280). – С. 86–96. (перечень ВАК)