

АБРАМОВ ТИМУР АЛЕКСЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ С
ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ЗАПАСАМИ**

Специальность 2.8.4 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Автореферат
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН).

Научный руководитель: **Индрупский Илья Михайлович**, доктор технических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник, заместитель директора по научной работе, ИПНГ РАН

Официальные оппоненты: **XXX**

XXX

Ведущая организация: **XXX**

Защита диссертации состоится «XX»_____2026 г. в XX:XX часов на заседании диссертационного совета 24.1.100.01 при ИПНГ РАН по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, аудитория 703.

С диссертацией можно ознакомиться у ученого секретаря диссертационного совета 24.1.100.01 при ИПНГ РАН и на сайте:

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.г.-м.н.

Кишанков А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Согласно классификации, предложенной Э.М. Халимовым и Н.Н. Лисовским (2009 г.), значительная часть из разрабатываемых в настоящее время месторождений в той или иной степени характеризуется наличием трудноизвлекаемых запасов (ТриЗ). Всего данная классификация включает 20 критериев, к которым, помимо одного из самых распространенных – низкой проницаемости пласта, также относятся малая нефтегазонасыщенная толщина, наличие контактных зон, высокая вязкость нефти, низкая проницаемость матрицы в условиях трещиноватого коллектора и др.

В большинстве случаев разработка залежей с ТриЗ возможна только за счет эксплуатации скважин сложной конструкции: вертикальных с гидроразрывом пласта (ВС с ГРП), горизонтальных (ГС), многозбойных горизонтальных (МЗГС), а также горизонтальных с многостадийным гидроразрывом пласта (ГС с МГРП). Учитывая, что строительство таких скважин составляет одну из основных статей капитальных затрат на разработку месторождения, обязательным условием является оценка эффективности их бурения и успешности проведения на них геолого-технологических мероприятий (ГТМ), а также мониторинг их параметров в процессе работы.

Одновременно с этим, эффективность разработки сложнопостроенных коллекторов напрямую зависит от понимания особенностей их дренирования по площади и разрезу. Данная информация является критически важной для точного прогноза уровней добычи, оценки рисков обводнения, корректного выбора сетки и траекторий скважин и др. С этой целью необходимо иметь достоверное представление о структурном строении залежи, характере ее разреза, наличии высоко- и низкопроницаемых слоев и каналов, их выдержанности и пространственной ориентации.

Одним из ключевых инструментов решения представленных задач являются гидродинамические исследования (ГДИ). При этом, несмотря на развитие и активное применение на современном этапе таких методов как анализ динамики добычи (АДД) и деконволюция, базовым и наиболее информативным способом оценки параметров системы «пласт-скважина» остаются методы, сопровождающиеся замером давления при остановке скважин – записью кривых восстановления и падения давления (КВД и КПД).

Однако в условиях залежей с ТриЗ эффективность методов КВД и КПД сильно ограничена. Это связано с рядом факторов:

1. Отсутствие на кривых изменения давления отклика на радиальный режим фильтрации, что является одной из фундаментальных проблем и в то же время самой распространенной причиной снижения достоверности исследований на протяжении всей истории развития гидродинамических методов. В случае ТриЗ низкие фильтрационные свойства в сочетании со сложной конструкцией скважин приводят к чрезвычайно длительным срокам выхода на классический радиальный режим, достичь которых невозможно в рамках стандартных исследований.
2. Неоднозначность результатов применения стандартных методик для интерпретации ГДИ, проводимых на сложнопостроенных залежах. Анализ «рядовых» исследований, как правило, опирается на ограниченный набор аналитических моделей, полученных на

основе решений уравнения пьезопроводности для упрощенных конфигураций системы «пласт-скважина». В случае сложнопостроенных коллекторов отклики давления зачастую являются комплексными, а их корректная интерпретация требует использования численных моделей и междисциплинарного анализа.

3. В случае трещиноватых коллекторов – невозможность интерпретации по модели двойной пористости/проницаемости, являющейся общепринятой в практике разработки и моделирования. Как показывает опыт, характерный отклик кривых давления на двойную среду достаточно редко встречается в практике ГДИ. Вместо этого наблюдается сложное поведение давления, однозначная интерпретация которого далеко не всегда представляется возможной. И несмотря на то, что полученный отклик отображает особенности работы системы трещин, выполненное исследование зачастую признается неуспешным.

Таким образом, с учетом роста доли и значимости месторождений с ТриЗ в общей структуре нефтегазодобычи, особую актуальность приобретает проблема повышения информативности ГДИ и достоверности интерпретации их результатов для скважин сложной конструкции и при эксплуатации сложнопостроенных коллекторов.

Степень разработанности проблемы

Теоретические представления о процессах нестационарной фильтрации, лежащие в основе теории интерпретации ГДИ, были заложены и развиты в трудах Баренблатта Г.И., Желтова Ю.П., Кочиной И.Н., Лапука Б.Б., Лейбензона Л.С., Щелкачева В.Н., Muskat M., Jacob C. и др. ученых.

Фундамент классической теории и методов интерпретации ГДИ сформирован работами Бузинова С.Н., Кульпина Л.Г., Мясникова Ю.А., Умрихина И.Д., Чекалюка Э.Б., Яковлева В.П., Dyes A., Erlougher R.C., Fetkovich M.J., Horner D.R., Hutchinson C., Matthews C.S., Miller C., Ramey H.J., Root P.J., Russel D.R., Warren J.E. и др. отечественных и зарубежных исследователей.

Современный этап развития гидродинамических методов связан с работами Асланяна А.М., Вольпина С.Г., Гуляева Д.Н., Давлетбаева А.Я., Иктисанова В.А., Ипатов А.И., Кременецкого М.И., Кричевского В.М., Мешкова В.М., Федорова В.Н., Шагиева Р.Г., Blasingame T.A., Bourdet D., Gringarten A.C., Horne R.N., Houzé O., Kamal M., Kuchuk F., Tiab D., von Schroeter T., Stewart G. и мн. др. специалистов.

Объекты исследования

Объектами исследования являются низкопроницаемые пласты, эксплуатируемые скважинами сложной конструкции (ГС с МГРП, ГС, ВС с ГРП), газовые залежи с малой газонасыщенной толщиной, трещиноватые коллекторы.

Цель работы

Целью работы является научное обоснование методик планирования и интерпретации результатов гидродинамических исследований скважин для повышения достоверности оценки параметров системы "пласт-скважина" на залежах углеводородов с трудноизвлекаемыми запасами.

Основные задачи

1. Обоснование возможности и разработка методики повышения информативности ГДИ в ГС с МГРП при ограниченной продолжительности КВД за счет особенностей суперпозиции давления при кратковременной отработке скважины перед остановкой.
2. Адаптация метода модификации кривых давления для скважин сложной конструкции и произвольной истории изменения дебита с целью сокращения сроков проявления отклика на радиальный режим течения на КВД. Разработка процедуры обработки данных гидродинамических исследований при использовании метода.
3. Анализ возможности диагностики особенностей разработки газовой залежи с малой газонасыщенной толщиной по данным ГДИ и распределения фильтрационных свойств пласта по разрезу. Определение характерных признаков конусообразования на КВД в вертикальных скважинах.
4. Обоснование возможности контроля изменения структуры трещиноватой зоны по данным повторных ГДИ в сложнопостроенных коллекторах. Анализ изменений в системе трещин и их влияния на продуктивность скважины при проведении ГТМ по циклическому геомеханическому воздействию (ЦГВ), ГРП и МГРП.

Соответствие паспорту специальности 2.8.4 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Тема и содержание работы соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 2.8.4 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений: п. 2: «Геолого-физические, геомеханические, физико-химические, тепломассообменные и биохимические процессы, протекающие в естественных и искусственных пластовых резервуарах и окружающей геологической среде при извлечении из недр и подземном хранении жидких и газообразных углеводородов и водорода известными и создаваемыми вновь технологиями и техническими средствами для развития научных основ создания эффективных систем разработки, обустройства и эксплуатации месторождений и подземных хранилищ жидких и газообразных углеводородов и водорода, захоронения кислых газов, включая диоксид углерода.», п. 4 «Средства обеспечения комплексного интегрированного проектирования и системного (мульти-дисциплинарного) мониторинга процессов разработки обустройства и эксплуатации месторождений и подземных хранилищ жидких и газообразных углеводородов и водорода в истощенных месторождениях, водонасыщенных пластах и соляных структурах с целью рационального недропользования».

Методы решения поставленных задач

При решении поставленных задач использовались:

1. анализ научно-технической литературы по различным аспектам гидродинамических исследований и, в частности, исследований скважин сложной конструкции и сложнопостроенных коллекторов;
2. построение и анализ синтетических кривых давления средствами аналитического и численного моделирования;

3. анализ фактических результатов исследования скважин различной конструкции и типа коллектора с применением аналитических и численных методов интерпретации;
4. многовариантное секторное гидродинамическое моделирование с анализом свойств, оказывающих характерное влияние на поведение КВД

Научная новизна

1. Для ГС с МГРП выявлен ранее неизвестный «радиально-подобный режим» (РПР) течения, проявляющийся на КВД в случае кратковременной отработки скважины до остановки. Предложена методика, позволяющая с высокой степенью достоверности оценивать параметры системы «пласт-скважина» на основе РПР, что позволяет существенно повысить информативность исследований при сохранении реалистичных сроков их проведения.
2. Для вертикальных скважин с гидроразрывом пласта и горизонтальных скважин предложена методика постобработки данных КВД с использованием метода модификации кривой давления, позволяющая значительно сократить время начала проявления диагностических признаков радиального режима и снизить неопределенность оценки гидропроводности пласта. Обоснован и верифицирован алгоритм интерпретации данных гидродинамических исследований с использованием методики.
3. Для водоплавающих газовых залежей с малой газонасыщенной толщиной представлена комплексная методика анализа данных ГДИ с использованием средств численного моделирования и учетом данных первичных и повторных исследований, распределения фильтрационных свойств и работы скважин окружения, позволяющая диагностировать особенности дренирования пласта по разрезу.
4. Для трещиноватых коллекторов предложена комплексная методика оценки изменения структуры естественной и техногенной трещиноватости по данным интерпретации ГДИ, заключающаяся в диагностике характерных откликов и отслеживании динамики их изменения по данным повторных исследований, что позволяет получить дополнительную информацию для контроля особенностей дренирования пласта, эффективности ГТМ и выбора оптимальных режимов эксплуатации скважин.

Теоретическая значимость

1. Показано, что суперпозиция давления при кратковременной отработке скважины перед остановкой позволяет проявить на КВД режимы, которые в иных случаях маскируются переходными процессами. Определены условия проявления радиально-подобного режима и обоснована возможность его использования для повышения достоверности оценки параметров системы «пласт-скважина».
2. Доказана принципиальная возможность и эффективность применения метода модификации кривых давления для повышения достоверности интерпретации и сокращения времени остановки на КВД скважин сложной конструкции.

3. Для высокопроницаемых газовых коллекторов обоснована необходимость учета при планировании и интерпретации КВД всей эффективной газонасыщенной толщины пласта, включая низкопроницаемые интервалы – глинистые и плотные «перемычки».
4. Обоснованы диагностические признаки формирования конуса подошвенной воды в вертикальных газовых скважинах по данным КВД.
5. Для трещиноватых коллекторов выявлен комплекс диагностических признаков и интерпретационных параметров, позволяющий оценивать характерные особенности сформированной системы трещин, изменения ее структуры и влияние на продуктивность скважины по повторным ГДИ.
6. Для ГС с МГРП, вскрывающей трещиноватый коллектор, обоснована эффективность применения инварианта линейного течения для оценки интегрального влияния работы системы естественных и техногенных трещин на продуктивность скважины на разных режимах.

Практическая значимость

1. Для ГС с МГРП предложена эмпирическая зависимость для оценки гидропроводности по РПР, алгоритм интерпретации КВД при наличии РПР и возможные схемы дизайна ГДИ с получением РПР. Показано, что их применение обеспечивает высокую достоверность оценки параметров системы «пласт-скважина» по результатам интерпретации. Показано, что в отдельных практически значимых случаях достигается снижение погрешности с 70% до 1%.
2. Для ГС и ВС с ГРП апробирован метод модификации кривых давления и предложен алгоритм его применения при интерпретации КВД. На примерах с реальными исходными данными показано, что их применение позволяет достигать снижения погрешности интерпретации с 30 % до менее чем 1 %, а также сокращения длительности замера на несколько сотен часов, что дает значительный экономический эффект за счет уменьшения времени простоя и операционных затрат на исследования.
3. Применительно к газовой залежи с малой газонасыщенной толщиной представленная комплексная методика анализа ГДИ позволяет в опережающем порядке (до выполнения специализированных керновых исследований) оценить влияние и проницаемость глинистых или плотных «перемычек». Полученная информация позволяет повысить достоверность петрофизических и гидродинамических моделей.
4. Обоснованная возможность выявления признаков конусообразования по данным КВД позволяет сократить объемы проведения дорогостоящего комплекса промыслово-геофизических исследований для мониторинга динамики продвижения газоводяного контакта, тем самым снижая затраты на проведение работ.
5. Для трещиноватых коллекторов представленные методики интерпретации разновременных ГДИ позволяют установить конфигурацию, особенности и параметры систем естественной и техногенной трещиноватости. Получаемая информация является критически важной для достоверного прогноза технологических показателей и формирования стратегии разработки месторождения, включая подбор оптимальных режимов эксплуатации скважин и эффективных ГТМ.

Практическая значимость результатов диссертационной работы и их успешное внедрение в производственные процессы ООО «Харампурнефтегаз» подтверждены актом внедрения.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Установлено существование для ГС с МГРП признаков «радиально-подобного» течения, возникающих на КВД при достаточно коротком времени отработки скважины перед остановкой. Данный режим, проявляющийся на среднем этапе замера, может быть использован для достоверной оценки гидропроводности пласта вместо классического раннерадialного режима (РР) в скважинах с близкорасположенными трещинами ГРП, для которых при ГДИ не формируются признаки классического РР.
2. Для скважин сложной конструкции доказана эффективность применения адаптированного метода модификации кривых давления, основанного на вычитании «маскирующего» члена асимптотического разложения для давления с подбором коэффициента модификации N . Представленный и верифицированный на синтетических и фактических данных алгоритм интерпретации позволяет значительно сократить необходимую длительность КВД для достоверной оценки гидропроводности пласта и связанных с ней параметров системы «пласт-скважина».
3. Применение обоснованной комплексной методики проведения и анализа ГДИ, включающей численное моделирование, междисциплинарный анализ и отслеживание динамики изменения отклика давления в ходе повторных исследований, является эффективным способом изучения особенностей дренирования газовых залежей с малой газонасыщенной толщиной.
4. Представленные методики интерпретации повторных ГДИ для трещиноватых коллекторов, основанные на детализации и сравнительном анализе откликов производной давления на первичной и повторных КВД, расширяют возможности контроля изменений структурных изменений естественной и техногенной трещиноватости в процессе эксплуатации скважин и реализации ГТМ.

Достоверность

Достоверность научных положений, выводов и результатов работы подтверждена:

1. применением известных аналитических и численных моделей для решения прямых и обратных задач ГДИ с использованием широко апробированных специализированных программных комплексов;
2. верификацией методик по данным многовариантного численного гидродинамического моделирования, а также их апробацией и слепым тестированием на синтетических кривых давления, рассчитанных на основе данных реальных месторождений;
3. успешным применением к интерпретации фактических данных гидродинамических исследований;
4. сопоставлением с результатами междисциплинарных исследований и данными, опубликованным в отечественной и зарубежной литературе.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: Конференция по газовым проектам (г. Тюмень, 27-28 июня 2019 г.), «Исследования скважин: Целеполагание, Технологии, Эффект» (г. Уфа, 27-28 мая 2021 г.), VII Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы нефти и газа» (г. Москва, 16-18 октября 2024 г.), Корпоративный нефтегазовый форум ПАО НК «Роснефть» «Разведка, Добыча, Развитие» (г. Тюмень, 29-31 октября 2024 г.), семинар ИПНГ РАН «Гидродинамические и промыслово-геофизические исследования в эксплуатационных скважинах со сложным заканчиванием, вскрывающих коллектора аномально низкой проницаемости, новые задачи, результативность, проблемы, пути решения» (г. Москва, 16 декабря 2024 г.), «Потенциал севера Западной Сибири: ресурсы и технологии» (г. Тюмень, 3-4 июня 2025 г.), XIV Международный форум исследователей «Современные методы исследования скважин и пластов для повышения эффективности разработки нефтегазовых месторождений» (г. Москва, 15-16 апреля 2025 г.), Международная конференция «Трудноизвлекаемые запасы нефти» (г. Альметьевск, 24.09.2025 г.). VIII Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы нефти и газа» (г. Москва, 14-17 октября 2025 г.), Корпоративный нефтегазовый форум ПАО НК «Роснефть» «Разведка, Добыча, Развитие» (г. Тюмень, 15-17 октября 2025 г.).

Личный вклад

Все представленные в диссертации результаты принадлежат автору и получены им в рамках собственных исследований или совместных исследований с руководителем и соавторами публикаций, при ключевом вкладе автора. Личный вклад автора состоит в определении направлений исследования, построении и анализе синтетических кривых давления с применением аналитических и численных моделей, проведении расчетов на численных гидродинамических моделях, анализе и обобщении полученных результатов, интерпретации фактических данных гидродинамических исследований, разработке, верификации и апробации методик, подготовке рисунков и графических материалов, апробации результатов исследований, в т.ч. в виде публикаций и научных докладов.

Публикации

Результаты работы отражены в 9 печатных работах, включая 8 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, из них 2 статьи в журналах, входящих в международные базы Web of Science и Scopus.

Объем и структура работы

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы из 119 наименований, содержит 121 рисунок и 21 таблицу.

Благодарность

Автор глубоко признателен д.т.н. Л.А. Гайдукову и С.В. Туленкову за помощь и содействие, которые позволили ему приступить к работе над диссертацией, а также своей семье – за неизменную поддержку на всех ее этапах. Автор также благодарит д.т.н. А.М. Свалова за идею, положенную в основу третьей главы, и предоставленную возможность использовать в работе результаты валидации разработанного им метода модификации кривых давления. Ценными для диссертации оказались советы и консультации, полученные от д.т.н., проф.

М.И. Кременецкого и В.М. Кричевского, а также от специалистов и экспертов ООО «РН-ГИР». Особую благодарность автор выражает своему научному руководителю доктору технических наук, профессору РАН И.М. Индрупскому – за глубокую вовлеченность, щедрую передачу знаний и всестороннюю поддержку в решении многочисленных научных и рабочих вопросов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальности выбранной темы исследований, сформулирована новизна и приведена практическая значимость полученных результатов работы.

В **главе 1** представлен обзор развития гидродинамических методов исследования и характерные особенности их проведения и интерпретации для объектов с ТрИЗ.

В основе методов гидродинамических исследований лежит теория нестационарной фильтрации, фундамент которой заложили работы Л.С. Лейбензона, И.А. Чарного, В.Н. Щелкачева, С. Jacob, M. Muskat и др. известных ученых.

За рубежом история применения гидродинамических методов берет свое начало с работы Ч. Тсейза (C. Theis) в 1935 г., в России – с публикации монографии В.П. Яковлева в 1936 г. Наиболее активное развитие гидродинамических методов начинается с публикаций работ Ч. Миллера (C. Miller), А. Дайса (A. Dyes) и Ч. Хатчинсона (C. Huthinson) в 1950 г. и Д. Хорнера (D.R. Horner) в 1951 г. В этих работах была обоснована логарифмическая зависимость давления от времени для плоскорадиальной фильтрации и предложен метод обработки КВД с построением полулогарифмического графика. В период 1950-1970 гг. дальнейшим развитием данного метода занимались С.Н. Бузинов, Л.Г. Кульпин, Ю.А. Мясников, И.Д. Умрихин, Э.Б. Чекалюк, F. Brons, K.K. Clark, D.N. Dietz, A.F. van Everdingen, P. Hazebroek, W. Hurst и др. За рубежом результаты развития данного метода были обобщены в первой монографии сообщества инженеров-нефтяников (Society of Petroleum Engineers, SPE) за авторством Ч. Мэттьюза (C.S. Matthews) и Д. Рассела (D.R. Russel), вышедшей в 1967 г.

В период 1970-1980-х гг. за рубежом активное применение нашел метод типовых кривых (палеток), использовавший построение теоретических кривых и сопоставление с фактическими данными КВД в билогарифмических координатах давления и времени. Автором данного метода был Х. Рейми (H.J. Ramey), работа которого вышла в 1970 г. Результаты развития метода типовых кривых были представлены во второй монографии SPE по гидродинамическим методам, вышедшей за авторством Р. Эрлаугера (R.C. Erlougher) в 1977 г.

В 1981 г. Д. Бурде (D. Bourdet) предложил использовать производную давления на билогарифмическом графике КВД, положив тем самым начало современному этапу развития гидродинамических методов. Этот этап напрямую связан с использованием компьютеризированного анализа результатов исследования, требующего задействование персональных компьютеров и специального ПО. Значительный вклад в современную методологию внесли работы С.Г. Вольпина, А.И. Ипатова, М.И. Кременецкого, Р.Г. Шагиева, A.C. Gringarten, R.N. Horne, O. Houzé, F. Kuchuk, G. Stewart, D. Tiab. Систематизация по наиболее важным зарубежным работам, использующим метод производных давления, была представлена в третьей и последней на сегодняшний день монографии SPE по ГДИ под редакцией М. Камала (M. Kamal), опубликованной в 2008 г.

На протяжении всей истории развития теории и методологии интерпретации ГДИ одной из фундаментальных проблем остается снижение достоверности результатов исследования в

случае недостижения (поздне-)радиального режима. На современном этапе в качестве одного из возможных способов решения данной проблемы предлагаются методы деконволюции и анализа динамики добычи. Вместе с тем, их применение существенно ограничено рядом условий, наиболее критичным из которых является длительный и качественный замер динамики дебитов и давлений. Кроме того, их применение не может дать однозначных оценок в том случае, если длительность выхода на (поздне-)радиальный режим сопоставима с длительностью эксплуатации месторождения, что особенно характерно для низкопроницаемых отложений, разрабатываемых ГС с МГРП.

В целом современная практика разработки месторождений нефти и газа сопровождается вовлечением запасов пониженного качества, значительная часть из которых по классификации Э.М. Халимова и Н.Н. Лисовского может быть отнесена к категории ТрИЗ. Их разработка напрямую связана с бурением скважин сложной конструкции: ВС с ГРП, ГС, МЗГС и ГС с ГРП. С учетом высоких капитальных затрат на их строительство, особую важность для оценки эффективности заканчивания и мониторинга состояния таких скважин приобретают ГДИ.

Одновременно с этим, следует отметить сниженную достоверность проводимых в данных условиях исследований. Одной из ключевых проблем для указанных скважин являются длительные сроки выхода на (поздне-)радиальный режим, что усугубляется в условиях низкой пьезопроводности объектов с ТрИЗ. Для скважин горизонтальной конструкции отдельную сложность представляет неопределенность по дренируемым толщинам, особенно в условиях наличия низкопроницаемых глинистых или уплотненных слоев – т.н. «перемычек».

Дополнительными трудностями характеризуется изучение гидродинамическими методами трещиноватых коллекторов, опыт проведения которых по всему миру показывает незначительную долю пластов с признаками порово-трещинного поведения. Вместо это чаще наблюдается более сложное и разнообразное поведение КВД, требующее детального анализа с применением междисциплинарных исследований и численного моделирования. Данная ситуация усугубляется в случае эксплуатации скважинами сложной конструкции, для которых характерно возникновение комплекса различного рода течений.

Таким образом, проведение и интерпретация результатов ГДИ в залежах с ТрИЗ сопряжены с рядом осложняющих факторов. К их числу относятся необходимость длительного замера КВД, неопределенность исходной геолого-технологической информации и сложный характер отклика на работу системы «пласт-скважина», особенно в условиях эксплуатации скважинами сложной конструкции. Это определяет актуальность развития и совершенствования методов проведения и интерпретации ГДИ для месторождений с ТрИЗ.

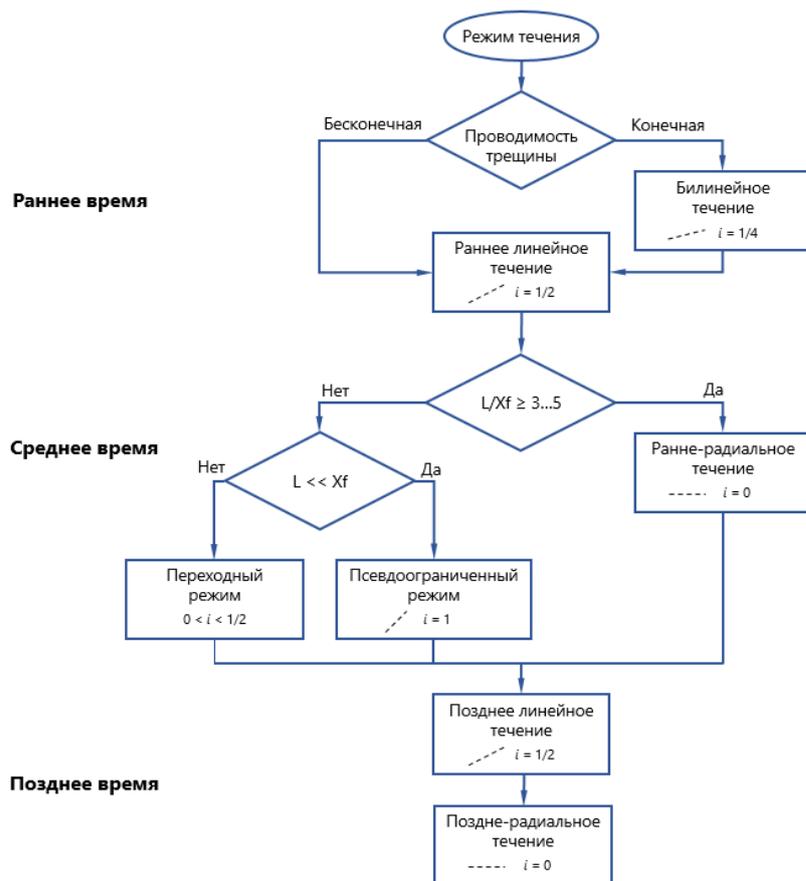
В главе 2 рассмотрены методические решения, позволяющие повысить информативность гидродинамических исследований в ГС с МГРП.

В сложившейся практике разработки залежей с ТрИЗ наиболее распространены ГС с трещинами МГРП, создаваемыми перпендикулярно стволу с равномерным размещением портов. В связи с этим, именно такой тип конструкции рассмотрен в рамках диссертационного исследования.

Для ГС с МГРП характерен комплекс различного рода течений, схема очередности и критериев возникновения которых представлена на рис. 1. Как известно, достоверность результатов ГДИ определяется фактом выхода на (поздне-)радиальный режим, по которому

производится оценка гидропроводности пласта kh/μ , где k – проницаемость, h – эффективная (работающая) толщина, μ – вязкость.. Однако наличие сложного комплекса режимов течения в окрестности ГС с МГРП отодвигает сроки выхода на позднерадialный режим на позднее время – от нескольких лет и более, чего на практике, как правило, достичь невозможно. Согласно выполненным оценкам, в таком случае погрешность определения параметров системы «пласт-скважина» при реалистичной продолжительности ГДИ может достигать 54-111 %.

В то же время, оценка гидропроводности пласта возможна по данным раннерадialного режима. Вертикальное положение горизонтального участка на билигарифмическом графике производной давления по логарифму времени (производной Бурде) для него обратно пропорционально произведению $N \cdot kh/\mu$, где N – количество трещин. Однако для возникновения данного режима должен выполняться критерий отсутствия интерференции между трещинами на соответствующем временном интервале. Как показано в работах М.И. Кременецкого и его учеников, это достижимо при относительно малых полудлинах трещин X_f и больших расстояниях между трещинами L с соотношением не менее $L/X_f = 3 \dots 5$. С учетом тенденции к увеличению числа стадий МГРП и полудлин трещин, на залежах с трудноизвлекаемыми запасами критерий проявления раннерадialного режима часто не выполняется.



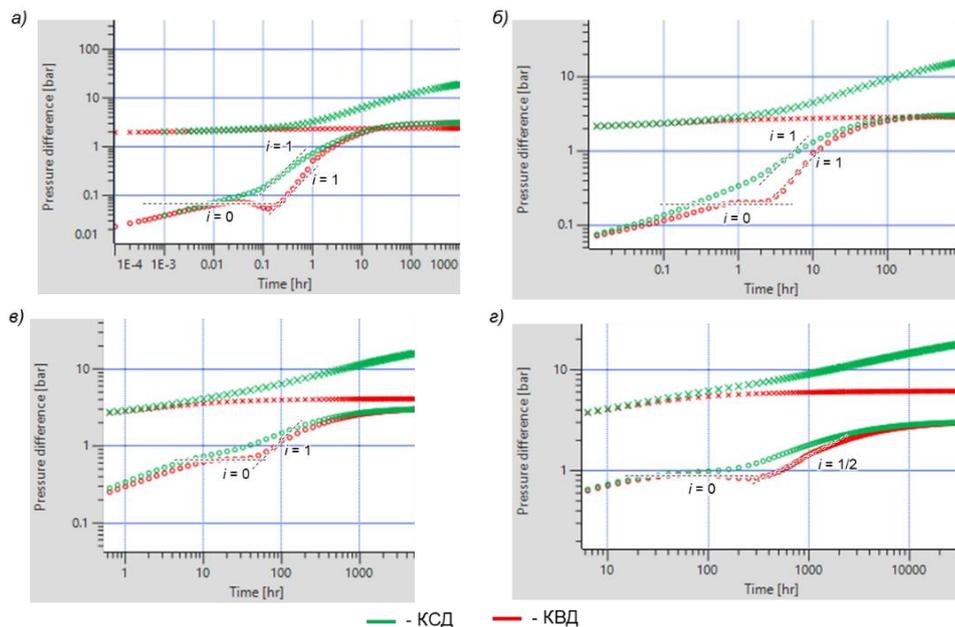
i – наклон (тангенс угла наклона) прямолинейного участка билигарифмического графика производной Бурде,
 L – расстояние между трещинами, X_f – полудлина трещин

Рис. 1 – Схема очередности и критериев возникновения режимов течения в ГС с МГРП

При плотном расположении трещин после раннего линейного режима может проявляться другое характерное течение, контролируемое сильной интерференцией трещин с псевдоустановившимся распределением давления между ними. Такое поведение схоже с

псевдостационарным режимом в ограниченном пласте, с отличием в том, что нестационарное возмущение давления продолжает распространяться за пределами ограниченного трещинами объема. В литературе не встречается однозначного названия для данного вида течения, однако наиболее подходящим, на взгляд автора, является термин «псевдоограниченное течение». Его характерным признаком на диагностическом графике кривой стабилизации давления (КСД) является проявление наклона, близкого к 1, аналогично «классическому» псевдостационарному течению.

В условиях интерференции между трещинами для ГС с МГРП возникает характерная особенность, связанная с зависимостью формы графика производной КВД на средних временах замера от длительности предшествующей отработки перед остановкой скважины. Такое поведение обусловлено особенностями суперпозиции реакций давления на, возникающих при отработке и последующем закрытии. Результаты построения синтетических КВД в ПО Карра Saphir при различных параметрах конструкции скважины показали, что для определенного диапазона продолжительности отработки перед остановкой на КВД отмечается формирование горизонтального участка – «полки», не наблюдающегося на исходной КСД. Пример подобного поведения на синтетических КВД представлен на рис. 2. Минимальное и максимальное значения длительности отработки, при которых наблюдается данное явление, в свою очередь зависят от особенностей конструкции скважины, определяемой расстоянием между трещинами и их длиной, и от пьезопроводности пласта. Таким образом, при кратковременной отработке на КВД наблюдаются признаки формирования некоторого «радиально-подобного» режима даже для таких скважин, конструкция которых не соответствует критерию $L/Xf \geq 3...5$. При этом такие режимы не наблюдаются на «исходных» синтетических КСД.



а) $hw = 25$ м; $T_{omp} = 0.1$ ч; б) $hw = 100$ м; $T_{omp} = 1$ ч; в) $hw = 400$ м; $T_{omp} = 10$ ч;
 г) $hw = 1000$ м; $T_{omp} = 100$ ч;

Рис. 2 – Период формирования горизонтального участка при кратковременной отработке для различных вариантов длины ГС на диагностических графиках синтетических КВД (hw – длина ГС с тремя трещинами МГРП; T_{omp} – время отработки)

Результаты оценки по влиянию длительности отработки T_{omp} и сжимаемости системы c_t на положение «полки» показали, что ее формирование действительно характеризует

проявление радиально-подобного режима (РПР), а не является следствием наложения переходных режимов.

По результатам численного моделирования и оценки распределения давления на момент времени доминирования различных характерных режимов выявлено формирование эллиптического течения вокруг трещин ГРП в период РПР. Согласно работам Д. Тиба (D. Tiab), для эллиптического режима течения вокруг трещин ГРП существует характерный диагностический признак – формирование на билогарифмическом графике производной Бурде прямолинейного участка с наклоном $i = 0,36$. Д. Тиабом также предложена методика оценки гидропроводности пласта по положению данного участка относительно оси давления. Такие признаки выделялись по рассчитанным синтетическим КВД при визуальном анализе периода, предшествующим выходу на РПР. С целью верификации возможности применения методики Д. Тиба для ГС с МГРП был выполнен расчет 40 синтетических КВД с откликом на РПР. Построение КВД производилось для следующих диапазонов параметров, определяющих возможность получения РПР: проницаемости $k = 0,2 \dots 2$ мД, вязкости $\mu = 1 \dots 30$ сП, полудлины трещин $Xf = 50 \dots 150$ м, расстояния между краевыми трещинами $hw = 200 \dots 1200$ м, количеством трещин $N = 3 \dots 10$. Итоги выполненного анализа показали неприменимость методики для РПР в ГС с МГРП, поскольку средняя погрешность оценки гидропроводности составила 218 %. Данный факт потребовал поиска зависимости для оценки гидропроводности по «полке» производной в период РПР, который производился на тех же синтетических примерах.

Зависимость отыскивалась с учетом следующих соображений. Для классического радиального режима вклад осесимметричной геометрии течения в зависимость между дебитом q и гидропроводностью определяется граничным условием на стенке скважины, вытекающим из закона Дарси:

$$q = \frac{kh}{\mu \cdot B} \cdot 2\pi r \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right| \text{ при } r = r_c \rightarrow 0 \quad (1)$$

где $h \cdot 2\pi r$ соответствует площади стенки скважины ($2\pi r$ – её периметру), через которую осуществляется приток, а $\frac{\partial p}{\partial r}$ – градиенту давления. При этом скважина приближенно считается точечным источником с радиусом $r_c \rightarrow 0$, что приводит к присутствию в итоговом решении только множителя 2π в качестве комплексного вклада периметра стенки скважины и расстояния, влияющего на действующий градиент давления. B – объемный коэффициент флюида.

В случае эллиптического притока к трещине бесконечной проводимости в роли источника выступает поверхность трещины с ненулевым периметром $4Xf$ (площадью $4Xf \cdot h$), а градиент давления должен иметь связь с половиной расстояния между трещинами $L/2$. Включив обе указанные величины в соответствующие части формулы для положения «полки» производной и подбирая недостающий множитель, удалось выявить следующую полуэмпирическую зависимость:

$$\frac{kh}{\mu} = \frac{q \cdot B \cdot L/2 \cdot \sqrt{2}}{(t \cdot \Delta p') \cdot 4\pi \cdot N \cdot 4Xf} \quad (2)$$

или

$$P_D = \frac{4\pi \cdot (t \cdot \Delta p') \cdot kh \cdot 4Xf \cdot N}{q \cdot \mu \cdot B \cdot L/2 \cdot \sqrt{2}} = 1, \quad (3)$$

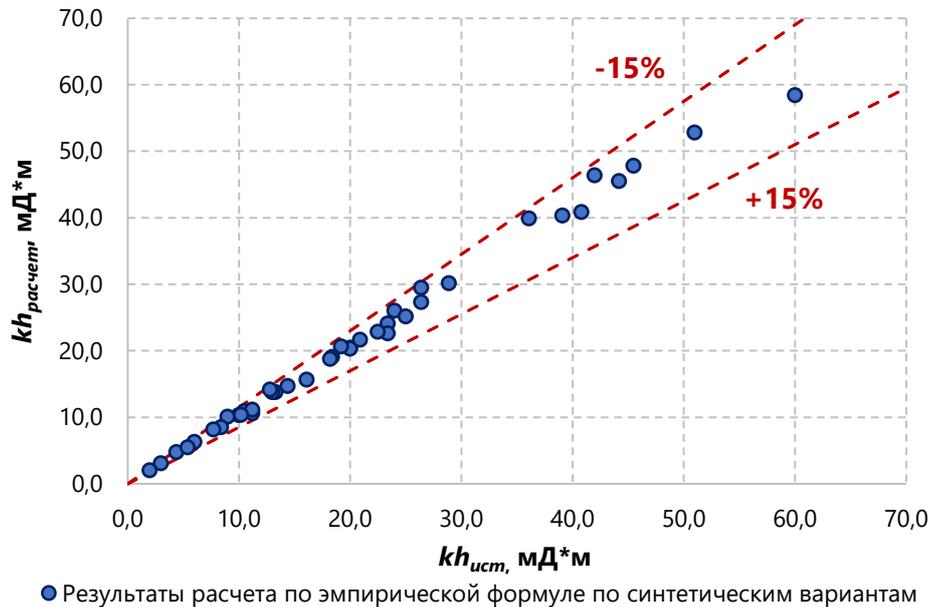
где $(t \cdot \Delta p')$ – уровень положения горизонтального участка на графике производной Бурде.

Формулы (2)-(3) справедливы для слабосжимаемого флюида – жидкости. Вместе с тем, ГС с МГРП также широко применяются при разработке низкопроницаемых газовых и газоконденсатных пластов. Как известно, нелинейности, связанные с зависимостью свойств газа от давления, разрешаются путем использования функции псевдодавления, благодаря которой становится возможным применять уравнения и методики интерпретации, разработанные для жидкости. Для положения «полки» РПР в координатах функции псевдодавления и с учетом пересчета дебита скважины на пластовые условия уравнение (3) примет вид:

$$P_D = \frac{2\pi \cdot (t \cdot \Delta m(p)') \cdot kh \cdot 4Xf \cdot N \cdot T_{ст}}{q \cdot L/2 \cdot \sqrt{2} \cdot T_{пл} \cdot p_{ст}} = 1, \quad (4)$$

где $(t \cdot \Delta m(p)')$ – уровень положения горизонтального участка на графике производной Бурде в координатах псевдодавления; $T_{ст}$ – стандартная температура (в абсолютной шкале); $T_{пл}$ – пластовая температура; $p_{ст}$ – стандартное (атмосферное) давление.

Результаты проверки эмпирической формулы показали достаточно высокую точность оценки гидропроводности пласта. Ошибка не превышает 12 % и по большинству вариантов находится в пределах 5-6 %, составляя в среднем 4,05 % (рис. 3).



а) распределение значений P_D по вариантам; б) кросс-плот расчетного и исходного значений kh

Рис. 3 – Результаты оценки погрешности формул (2) и (3)

В то же время применение формул (2)-(4) имеет ограничения. В первую очередь они выведены для трещин бесконечной проводимости, для которых по результатам численного моделирования к моменту развития эллиптического режима наблюдается постоянное значение давления вдоль поверхности трещины. Кроме того, для трещин бесконечной проводимости зависимость перестает работать при значительном увеличении расстояния между трещинами (по отношению к их полудлине Xf), когда выявленный РПР переходит в классический

раннерадийный режим. Также следует отметить, что формулы (2)-(4) содержат два неизвестных параметра: непосредственно саму гидропроводность и полудлину трещин X_f .

С целью снижения влияния данных ограничений предложен алгоритм проведения и интерпретации исследований с получением РПР на практике. Получение РПР возможно при остановке скважины на начальном этапе эксплуатации, в период освоения. В процессе записи КВД необходимо дождаться получения отклика не только на сам РПР, но и на последующий переходный режим. Затем по уровню «полки» РПР по формулам (2) или (4) производится оценка значения гидропроводности (или проводимости kh) пласта для ожидаемого значения полудлины трещин X_f . На следующем шаге производится настройка модели на факт с помощью нелинейной регрессии, включая уточнение X_f . По характеру настройки модели на переходный режим определяется необходимое направление корректировки значения kh . Пример настройки модели на синтетическую КВД на таких промежуточных итерациях представлен на рис. 4. Данные шаги повторяются до получения наилучшего совпадения между модельными и фактическими данными. Результаты слепого тестирования показали достаточность малого числа итераций до получения наилучшего совмещения модели и факта, а также высокую точность результатов интерпретации, достигающую 99 % даже для случая низкопроводящих трещин.

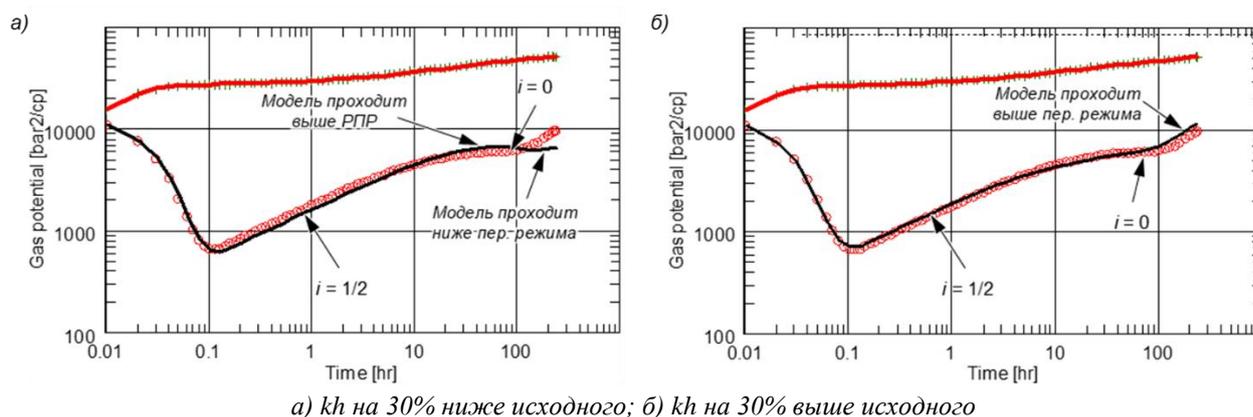


Рис. 4 – Алгоритм настройки модели на синтетическую КВД с учетом РПР и последующего переходного режима

Согласно выполненным оценкам, учитывающим реалистичные ограничения по длительности отработки и замера КВД, получение РПР на практике возможно для ГС с МГРП, вскрывающих пласты с проницаемостью от 0,04 до 2 мД. При этом для пластов с проницаемостью порядка 1 мД возникновение РПР возможно при относительно небольших временах отработки и требует работы скважины на одном режиме перед остановкой. В то время как для пластов с ультранизкой проницаемостью – $k < 0,1$ мД – формирование РПР остается возможным даже для длительных периодов отработки (до нескольких лет) и при сложной истории добычи, включающей периоды работы на различных режимах с промежуточными остановками.

В главе 3 представлена методика применения метода модификации исходной зависимости давления от времени для скважин сложной конструкции.

Метод модификации кривых давления был предложен в работе А.М. Свалова и Т.Н. Цаган-Маджиева для вертикальных скважин с высокими скин-фактором и коэффициентом

влияния ствола скважины (ВСС), для которых характерно наличие длительного переходного периода между окончанием ВСС и выходом на радиальный режим. Суть метода базируется на анализе точного решения уравнения пьезопроводности для ВС с учетом ВСС и наличия скин-зоны, согласно которому формулу для зависимости забойного давления P_3 от времени t в период КСД можно представить в виде асимптотического разложения:

$$P_3 = P_{пл} - \frac{qB\mu}{4\pi kh} \cdot \left[\ln \frac{2,25kt}{\mu\beta^*r_c^2} + \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \cdot \ln \left(\frac{r_s}{r_c} \right)^2 \right] + M \cdot \frac{\ln t}{t} + \dots, \quad (5)$$

где k_s – проницаемость скин-зоны; r_s – радиус скин-зоны; M – некоторая постоянная величина, зависящая от параметров системы «пласт-скважина», β^* – полная упругость системы, $P_{пл}$ – пластовое давление.

В случае записи КВД для метода Хорнера разложение приобретает вид:

$$P_3 = P_{пл} - \frac{qB\mu}{4\pi kh} \ln \frac{T+t}{t} + M \cdot \left[\frac{\ln \frac{T+t}{t}}{T+t} - \frac{\ln t}{t} \right] + \dots, \quad (6)$$

где T – длительности отработки перед закрытием скважины, t – время с момента остановки скважины.

Под многоточием в уравнениях (5), (6) обозначены члены асимптотического разложения, имеющие более высокий порядок малости при больших значениях времени. А.М. Сваловым было выдвинуто предположение, что если из уравнений (5) или (6) вычесть вторые по старшинству члены асимптотических рядов, то модифицированная таким образом функция давления будет быстрее по времени приближаться к главным членам этих рядов, т.е. приходиться к исходному виду уравнений КСД и КВД для радиального режима соответственно. При этом величина M является неизвестной и определяется перебором, исходя из условия наиболее быстрого выхода производных модифицированных функций давления на горизонтальную асимптоту.

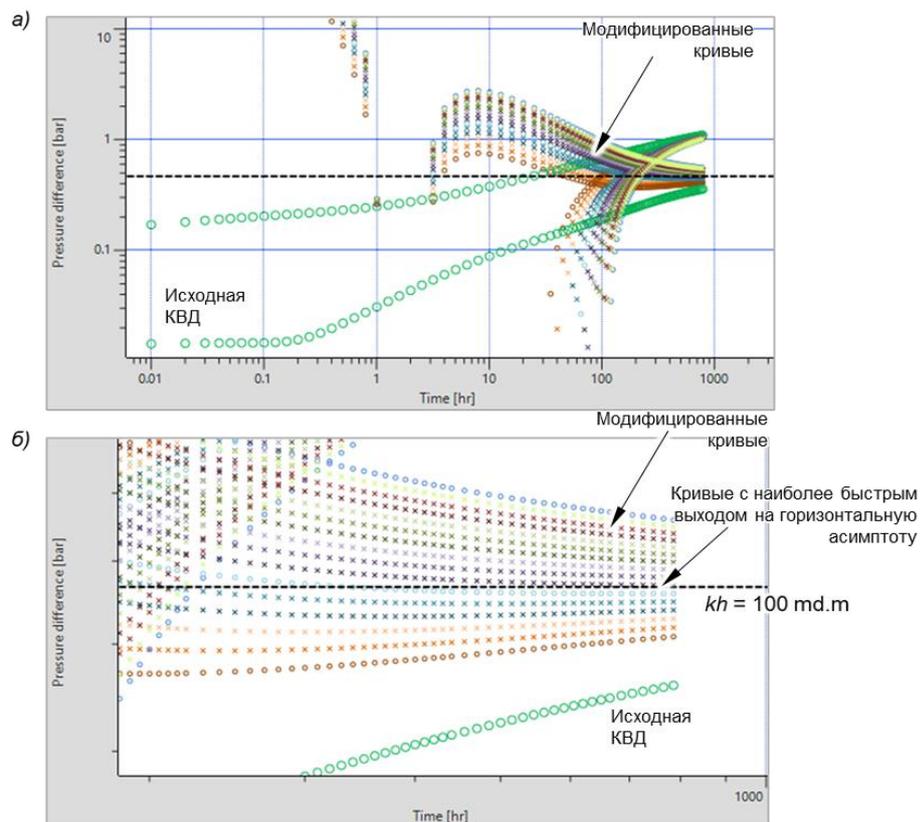
В диссертации рассмотрено предположение, что метод модификации имеет потенциал применения для скважин сложной конструкции, для которых проблема длительного выхода на (поздне-)радиальный режим является более актуальной. При значительном удалении условного фронта фильтрационного возмущения от призабойных зон скважин со сложным заканчиванием эффект воздействия этих зон на фильтрационное течение становится аналогичным эффекту воздействия призабойных зон вертикальных скважин. Такое подобие одномерных течений для ВС и фильтрационных течений на позднерадальном режиме для скважин со сложным заканчиванием дает основание считать, что и вторые по старшинству члены соответствующих асимптотических рядов (5)-(6) и их аналогов для «сложных» скважин должны быть подобными. Отсюда следует, что модификация функций давления посредством вычитания выражений $M \cdot \frac{\ln t}{t}$ для КСД и $M \cdot \left[\frac{\ln \frac{T+t}{t}}{T+t} - \frac{\ln t}{t} \right]$ для КВД также может обеспечивать более ранний выход производных Бурде модифицированных функций давления на постоянное значение при ГДИ скважин со сложным заканчиванием.

В рамках рассматриваемой методики также предложено использовать обобщенное время Хорнера (время суперпозиции). Тогда модифицированная функция давления будет строиться путем вычитания выражения для вторых по старшинству членов асимптотического ряда, соответствующих формуле (6) и имеющих вид:

$$N \cdot \left[\sum_{i=1}^{n-1} \frac{q_i - q_{i-1}}{q_n - q_{n-1}} \frac{\ln(t_{n-1} - t_{i-1} + t)}{t_{n-1} - t_{i-1} + t} + \frac{\ln(t)}{t} \right], \quad (7)$$

где N – параметр, подбираемый из условия наиболее быстрого выхода производной модифицированной функции давления на горизонтальный участок, n – суммарное количество режимов (включая исследуемый при $i = n$), q_i – дебит на i -м режиме, t_i – длительность отработки на режимах до исследуемого (с $i = 1$ до $i = n - 1$), t – время замера на исследуемом режиме при $i = n$.

Проведена валидация методики на различных вариантах конструкций скважин, типов флюида, синтетических и фактических данных. Предложен алгоритм наиболее успешного ее применения, включающий построение семейства модифицированных кривых, показывающих асимптотику выхода на горизонтальный участок «сверху» и «снизу». По семейству кривых производится поиск «оптимальной» кривой, обеспечивающей наиболее быстрое формирование горизонтального участка. Пример применения алгоритма для синтетической КВД представлен на рис. 5. Из представленного рисунка видно, что модифицированные кривые показывают выход на исходную «полку» позднерадимального режима, в то время по первоначальной КВД на конец замера наблюдается только переходный режим.



а) общий вид; б) интервал конечного участка производной в увеличенном масштабе

Рис. 5 – Пример модификации КВД для ГС

По результатам выполненных оценок, в случае недостижения (поздне-)радиального режима применение методики позволит снизить погрешность интерпретации до уровня порядка 1%. Не менее важной является и возможность существенного сокращения длительности остановки для проведения ГДИ с достоверной оценкой параметров в ВС с ГРП или ГС, которое в различных рассмотренных примерах составило сотни часов, или до 10 раз и более. Тем

самым, внедрение методики позволит существенно сократить потери добычи или закачки при исследовании скважин сложной конструкции.

В то же время, применение методики требует проявления на кривой давления переходного участка, предшествующего позднерадiallyному режиму. Поэтому для ГС с МГРП в низкопроницаемых коллекторах она не приводит к снижению времени ГДИ до практически приемлемых величин. Поэтому для таких скважин рекомендуется использование методических решений, обоснованных в главе 2.

В главе 4 описана и верифицирована методика изучения характерных особенностей разработки газовой залежи с низкой эффективной газонасыщенной толщиной на основе гидродинамических методов на примере объекта в сеноманских отложениях. Рассматриваемая в данной главе залежь характеризуется наличием глинисто-алевролитовой перемычки, разделяющей пласт на два циклита: верхний (ПК1-1) и нижний (ПК1-2). Нижний циклит при этом характеризуется наличием подошвенной воды. Низкая эффективная толщина и контактные запасы позволяют отнести рассматриваемый объект к категории ТриЗ.

Основным проектным решением для разработки залежи стало бурение горизонтальных стволов с проводкой по верхнему циклиту. Задействие нижнего циклита в процессе разработки предполагалось за счет дренирования через окна слияния – зоны отсутствия перемычки. Однако по мере накопления геологической и промысловой информации начинало формироваться представление о дренировании всего газонасыщенного разреза через перемычку, что стало обоснованием для формирования программы специальных исследований ядра. С другой стороны, данный факт должен иметь отражение на результатах ГДИ. С этой целью был выполнен детальный анализ по ряду скважин с нестандартным поведением КВД с привлечением результатов междисциплинарных исследований и воспроизведением отклика давления с помощью численных моделей.

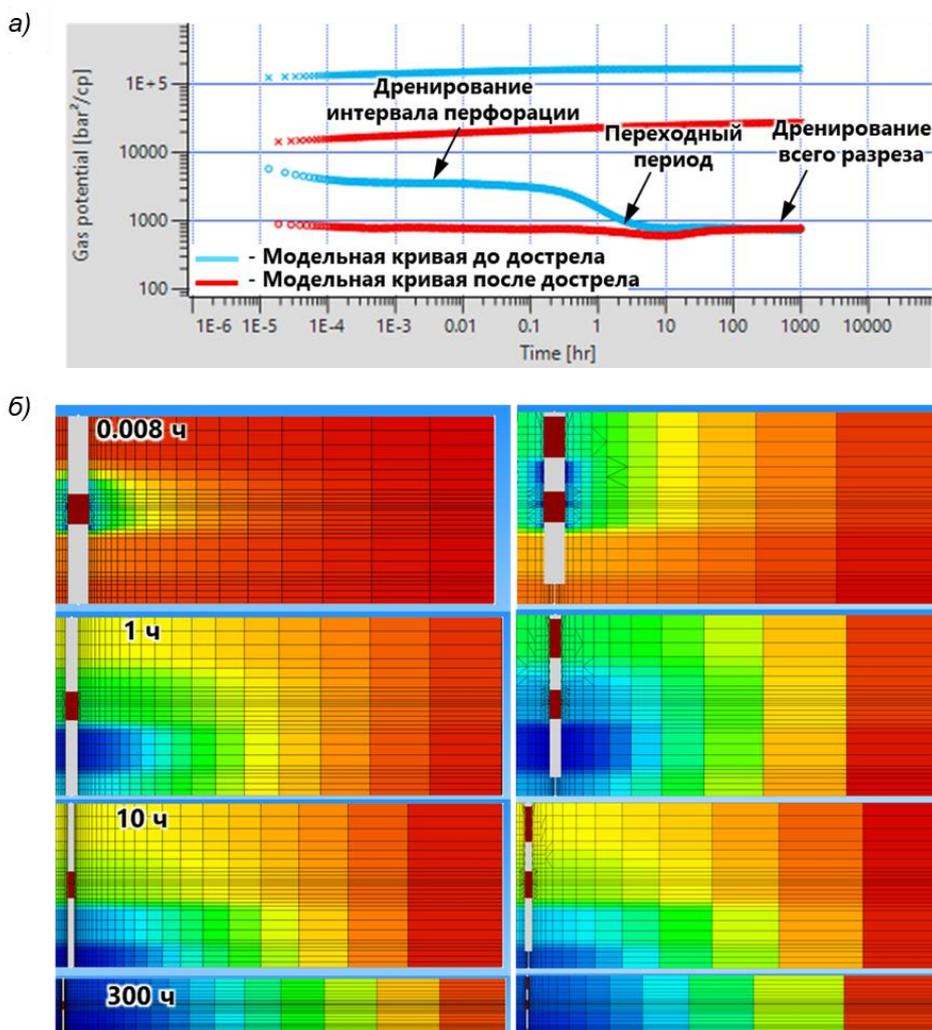
Первые признаки, достоверно подтверждающие проницаемый характер перемычки, были получены по результатам приобщения интервала перфорации («дострела») в верхнем циклите по вертикальным скважинам ХХ5 и ХХ2. По данным ГДИ после дострела значение проводимости пласта kh осталось неизменным при явном снижении скин-фактора и увеличении продуктивности скважин. Данный факт указывал на охват дренированием одинаковой газонасыщенной толщины до и после дострела. Это позволило сделать вывод о том, что отклик КВД до дострела несет ценную информацию о проницаемости перемычки, оценить которую возможно путем воспроизведения ГДИ на численной секторной модели слоистого коллектора.

Количество слоев модели, их толщина и абсолютная проницаемость задавались согласно данным РИГИС. Далее производилась настройка модельных кривых на фактические КВД до дострела. Ключевым настроечным параметром при этом являлась проницаемость перемычек. На втором шаге производилась верификация полученной модели на КВД, записанной после приобщения дополнительного интервала перфорации. По результатам настройки численная модель по обоим скважинам показала точное воспроизведение фактического отклика давления на ГДИ. В свою очередь, оценка особенностей распределения давления в пласте на характерные этапы замера КВД позволила получить понимание особенностей охвата дренированием по разрезу. Пример подобных построений для скв. ХХ5 представлен на рис. 5. В процессе интерпретации проницаемость коллектора по РИГИС существенно не изменялась, что

подтвердило взаимную корректность оценок проницаемости по коллектору, полученных между двумя независимыми методами – ГДИ и РИГИС.

Аналогичным образом выполнено моделирование по скв. XX10, работавшей только на верхний цикл. Отклик КВД по данной скважине не поддавался однозначной интерпретации с использованием стандартных аналитических моделей. По результатам настройки численная модель более точно воспроизвела фактическое поведение давления.

Далее представленный подход был использован для анализа сложных откликов КВД и гидропрослушивания по горизонтальным скважинам нового куста. Модель, учитывающая особенности распределения фильтрационно-емкостных свойств по слоям коллектора, контуры залежи и работу скважин соседних кустов, позволила воспроизвести нестандартные отклики, полученные по результатам исследования, и подтвердила актуальность параметров принятой геолого-гидродинамической модели (ГГДМ).



а) сопоставление диагностических графиков синтетических КВД; б) дренирование разреза на характерные моменты времени КВД
Синий цвет соответствует областям минимального давления, красный – максимального

Рис. 4.8 – Результаты расчета модели на характерных этапах дренирования пласта для двух вариантов вскрытия скв. XX5

В результате выполненной работы было установлено, что в условиях проницаемой перемычки вся продуктивная толщина залежи охватывается дренированием за короткое время

от момента запуска скважины – около 10 ч. Диапазон значений проницаемости перемычки по данным моделирования составил 0,1-50 мД. Такой диапазон, несмотря на большое верхнее значение, соответствует проницаемости образцов керна, отнесенных по граничному значению пористости к неколлектору.

По результатам построения численной модели скв. ХХ2 также была выполнена оценка диагностических признаков подъема в ней конуса подошвенной воды. Сектор ГГДМ, учитывающий полученное распределение фильтрационных свойств по разрезу, позволил воспроизвести фактические темпы подъема конуса, регистрируемые по данным импульсного нейтрон-нейтронного каротажа, без проведения дополнительной настройки. По данным ретроспективного анализа всех КВД и их сопоставлении с модельными данными было выявлено, что фактические кривые с самого начала формирования конуса показывали соответствующие диагностические признаки в виде прямолинейного участка производной с отрицательным наклоном. Однако их распознавание было затруднено зашумленностью производных, характерной для сеноманских скважин и вызванной невысокими депрессиями, при которых замер КВД происходит в условиях предела разрешающей способности глубинных приборов. Полученные результаты послужили обоснованием необходимости использования глубинных манометров с высокоточными кварцевыми датчиками.

Таким образом, на примере рассмотренного объекта была предложена и верифицирована комплексная методика изучения особенностей дренирования маломощных газовых залежей, включающая детальный анализ отклика забойного давления на КВД и динамику его изменения в процессе повторных ГДИ, привлечение результатов междисциплинарных исследований и воспроизведение отклика КВД с помощью численных моделей.

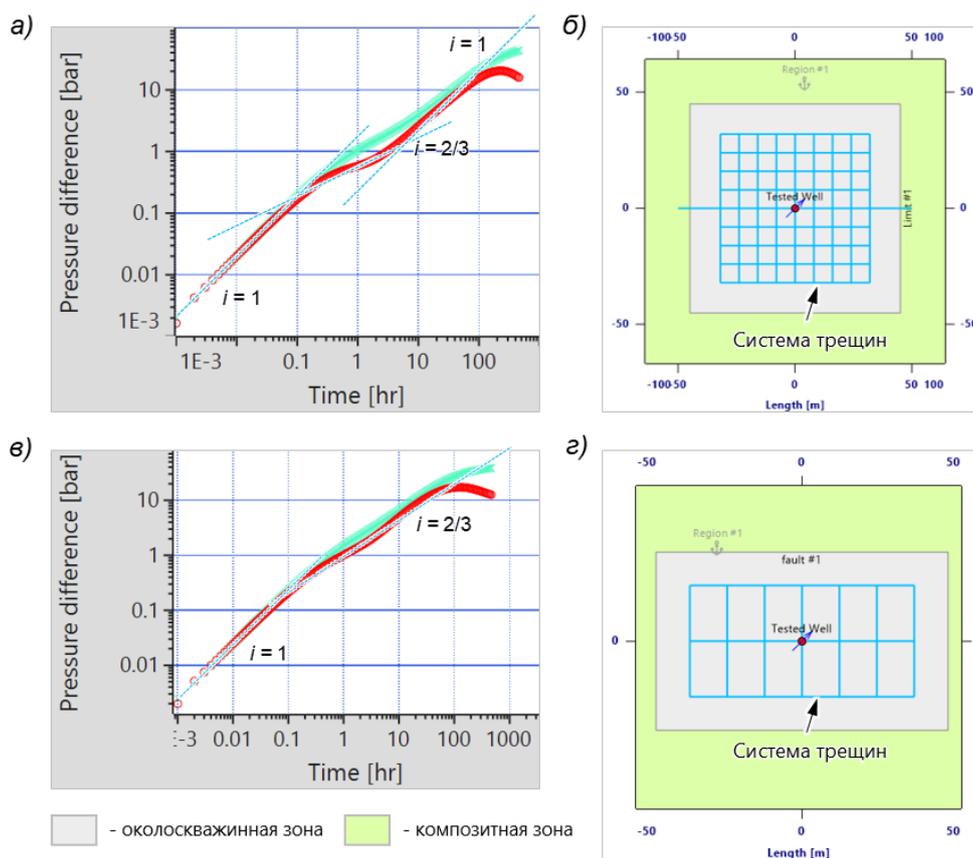
В главе 5 представлена методика детализированной интерпретации КВД, расширяющая информативные возможности ГДИ как метода контроля изменчивости техногенной трещиноватости в условиях трещиноватых коллекторов при проведении повторных исследований.

Из работ Ф. Кучука (F. Kuchuk), М.И. Кременецкого и Н.А. Морозовского и др. авторов известно, что для КВД, записываемых при исследовании трещиноватых коллекторов, характерно формирование разнообразных наклонов прямолинейных участков на билогарифмическом графике производной Бурде. Это является следствием комбинации различных факторов, связанных с геометрическими и проводящими свойствами сформированной системы трещин. Данные особенности позволяют выявить расположение скважин в единой зоне с характерной конфигурацией трещин по результатам проведения ГДИ. Такая информация является важной с точки зрения планирования корректной стратегии разработки месторождений. Наиболее точным способом описания поведения системы трещин является численное моделирование с заданием DFN-моделей трещин (от англ. discrete fracture network – система дискретных трещин), которое может быть использовано в качестве одного из методов верификации принятой концепции трещиноватости.

Также для трещиноватых коллекторов зачастую характерна изменчивость поведения КВД по результатам повторных исследований, выполняемых в процессе эксплуатации скважин. Как правило, изменчивость обусловлена эффектами смыкания/раскрытия трещин, зависящими от интенсивности режима перед КВД, истощения зоны дренирования в процессе выработки и др. факторов. Другой причиной изменения поведения кривой давления является воздействие на

призобойную зону при выполнении геолого-технологических мероприятий (ГТМ). Изучение подобных изменений несет не менее важную информацию для оценки оптимального режима работы скважины и анализа эффективности проводимых мероприятий. Однако с учетом сложного характера отклика КВД это становится достаточно трудоемкой задачей. В диссертации показано, что ее возможно решить путем детализированной интерпретации КВД с комплексной диагностикой откликов и отслеживанием их динамики при выполнении повторных замеров.

Предложенная методика позволила оценить особенности структурных изменений трещиноватости карбонатного коллектора по КВД, записанным после этапов создания глубокой депрессии (КВД-2) и закачки жидкости (КВД-3) при проведении циклического геомеханического воздействия (ЦГВ). На основании детализации откликов и изучения литературных источников удалось воспроизвести фактические особенности КВД путем численного моделирования с явным заданием трещин (DFN). По результатам моделирования были выявлены изменения в характерной геометрии созданной системы трещин, их плотности, а также области распространения и проницаемости. Это дало важную информацию для более полного понимания влияния ЦГВ на изменение состояния системы «пласт-скважина» и структуры трещиноватости в зоне дренирования.



а) диагностический график модельной КВД-2, б) модель системы трещин КВД-2; в) диагностический график модельной КВД-3; г) модель системы трещин КВД-3

Рис. 5.5 – Результаты воспроизведения КВД при проведении ЦГВ с помощью модели явных трещин

В ходе изучения потенциала пластов березовской свиты, сложенных хрупким опоковидным коллектором, предложенная методика позволила установить взаимосвязь между полученным откликом КВД и интенсивностью работы системы трещин в зоне расположения

исследуемых скважин. По результатам анализа было выделено три типовых отклика КВД после гидроразрыва пласта: рост производной с наклоном $i \approx 1/4 \dots 1/2$, отрицательный наклон производной и волнообразное поведение производной. Скважины с первым типом отклика находились в зоне с минимальной интенсивностью естественных трещин, что стало причиной формирования «классических» вертикальных трещин гидроразрыва. Установить причину проявления второго типа отклика стало возможным по данным литературного обзора. Было выявлено, что он связан с формированием блочной структуры трещин, не пересекающей скважину напрямую. Это коррелировало с расположением скважин в зоне умеренной трещиноватости. По скважинам с третьим типом отклика, характеризующимся максимальной продуктивностью и расположенным в зоне с максимальной интенсивностью трещин, после гидроразрыва наиболее вероятно активировалась сеть мелких трещин, проявившихся как типичная двойная среда.

Результаты ГДИ показали, что ключевой эффект от ГРП связан не с формированием единичной вертикальной трещины, а с инициацией уже созданных естественных трещин, изначально залеченных вторичными минералами. Выявлено, что раскрытие трещин происходило в пределах достаточно обширной зоны, радиус которой составлял порядка 100 м. При этом результаты КВД показали эффект «дыхания» трещин, связанный с их раскрытием и смыканием в зависимости от интенсивности и длительности отработки на предшествующем КВД режиме.

Описанная методика также легла в основу анализа результатов исследования ГС с МГРП, вскрывающей газонасыщенный пласт с аналогичным типом коллектора. Установлено, что наибольшую информативность для ГС с МГРП несет комплексный анализ КВД с детализацией отклика давления на диагностическом графике и оценкой изменения величины инварианта линейного течения, определяемого путем построения характеристического графика КВД для линейного режима. В работах М.И. Кременецкого с соавторами инвариант линейного течения был предложен в качестве интерпретационного параметра, характеризующего приток к трещине ГРП. В данной работе он используется для оценки интегрального влияния системы естественных и техногенных трещин на приток к скважине. Представленный метод позволил выявить сложные геомеханические эффекты в работе системы естественных и техногенных трещин, ставшие причиной переменной продуктивности скважины и невозможности корректной интерпретации методом нелинейной регрессии. По результатам выполненного анализа удалось установить наличие вероятной связи между изменениями инварианта линейного течения и коэффициента продуктивности на различных режимах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы работы заключаются в следующем:

1. Для ГС с МГРП, широко применяемых на месторождениях с ТриЗ, выявлено и доказано формирование на графике производной давления признаков радиально-подобного режима (РПР) течения при кратковременной отработке скважины перед остановкой на КВД. Его возникновение связано с особенностями суперпозиции давления в условиях интерференции трещин ГРП и короткой отработки скважины перед остановкой. Производная давления в период проявления РПР несет ценную информацию о гидропроводности пласта, достоверно оценить которую в ГС с МГРП в большинстве случаев не представляется возможным. В работе выведена полуэмпирическая

- зависимость для оценки гидропроводности по «полке» производной в период РПР в случае трещин бесконечной проводимости. Показаны ограничения в её применении и обоснована достаточная точность в широком диапазоне практически важных случаев. Предложены схемы дизайна ГДИ для получения РПР. Описана методика и протестирован алгоритм интерпретации ГДИ с использованием РПР для случаев трещин бесконечной и конечной проводимости. По результатам выполненных оценок, применение методики позволяет снизить погрешность интерпретации КВД в ГС с МГРП до 1 %, что подтверждает ее практическую значимость.
2. Предложена методика применения для ВС с ГРП и «классических» ГС метода модификации исходной зависимости давления от времени, позволяющего ускорить проявление на графике производной КВД горизонтального участка – «полки» радиального режима. Разработан алгоритм реализации методики, позволяющий существенно снизить погрешность оценок параметров системы «пласт-скважина» в условиях неполного выхода на «полку» (поздне-)радиального режима. Методика имеет высокий потенциал практического применения для объектов с ТриЗ, т.к. позволяет достоверно оценивать параметры системы «пласт-скважина» при сокращении требуемой продолжительности исследований на порядок (сотни часов), что существенно снижает операционные затраты и потери добычи на проведение ГДИ.
 3. Для газовых залежей с низкой газонасыщенной толщиной доказана эффективность применения комплексной методики изучения по ГДИ особенностей дренирования объекта. Методика включает детальный анализ отклика КВД, его изменения при повторных ГДИ и воспроизведение методами численного моделирования, а также использование результатов междисциплинарных исследований. По результатам выполненной работы установлены короткие сроки охвата дренированием всего продуктивного разреза с момента запуска скважины и показана возможность опережающей оценки проводимости низкопроницаемой глинисто-алевролитовой «перемычки» в условиях отсутствия специальных керновых исследований. Подтверждены диагностические признаки подъема конуса подошвенной воды в вертикальных скважинах, проявляющиеся в виде прямолинейного участка снижения производной КВД. Обоснована необходимость использования высокоточных кварцевых манометров для повышения информативности контроля разработки рассматриваемого типа залежей. Применение методики обеспечивает получение важной информации для достоверного планирования стратегии разработки месторождения.
 4. Для трещиноватых коллекторов предложена методика детализированной интерпретации КВД, расширяющая информативные возможности повторных ГДИ для контроля изменения техногенной и естественной трещиноватости в процессе эксплуатации скважины и после проведения ГТМ. Актуальность продемонстрирована на практических примерах, подтверждающих тезисы из литературы о том, что признаки двойной пористости достаточно редко встречаются на практике. Показано, что в таких условиях максимальная информативность интерпретации ГДИ может быть получена при проведении сравнительного анализа повторных КВД с комплексной диагностикой наблюдаемых откликов и оценкой изменений структуры и параметров зон трещиноватости. Обосновано, что для ГС с МГРП, вскрывающей трещиноватый коллектор, одним из методов качественного анализа изменчивости продуктивных

характеристик системы техногенных и естественных трещин является оценка динамики инварианта линейного течения. Показана ее взаимосвязь с динамикой коэффициента продуктивности скважины.

В целом результаты диссертационной работы дают основу для существенного повышения информативности оценки параметров системы «пласт-скважина» и контроля разработки залежей с ТриЗ различного типа.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Web of Science Core Collection, Scopus)

1. Абрамов Т.А., Индрупский И.М. Особенности и информативные возможности раннерадialного режима на КВД в горизонтальных скважинах с близко расположенными трещинами МГРП // Записки Горного института. – 2025. – Т. 276. – Вып. 2. – С. 29-48. EDN GOYQFR
2. Киселев А.Н., Гордеев А.О., Абрамов Т.А., Аккерман А.Ш. Стратегия разработки порово-трещиноватых низкопроницаемых коллекторов березовской свиты // Нефтяное хозяйство. – 2025. – № 9. – С. 24-29. – DOI 10.24887/0028-2448-2025-9-24-29. – EDN LJGEAN.
3. Абрамов Т.А., Индрупский И.М. О возможности надежной оценки параметров системы «пласт-скважина» по данным краткосрочных КВД в ГС с МГРП // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. (в печати)

Статьи в научных изданиях, рецензируемых ВАК

4. Абрамов Т.А., Гордеев А.О., Лознюк О.А., Тюлькова А.И., Афонин Д.Г. Анализ результатов планирования и проведения ГДИ пластов березовской свиты // Нефтяная провинция. – 2019. – № 4. – С. 234-247. DOI:10.25689/NP.2019.4.234-247
5. Абрамов Т.А., Аккерман А.Ш., Александров А.А., Абзгильдин Р.Р., Лузан Л.А. Анализ гидродинамических исследований маломощной сеноманской газовой залежи при наличии проницаемой глинистой перемычки // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2024. – Т. 15, № 4. – С. 381–400. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2024-15-4.art5>
6. Абрамов Т.А., Аккерман А.Ш., Киселёв А.Н. Анализ причин отсутствия диагностических признаков трещины гидроразрыва на КВД // Нефтяная провинция. – 2025. – № 3 (43). – С. 206-223. – DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2025.3.206-223>. - EDN YJPMWU
7. Абрамов Т.А., Индрупский И.М. О возможности оценки изменения структуры трещиноватости по повторным ГДИ при реализации геомеханических методов воздействия в карбонатных коллекторах // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2025. – Т. 16, № 3. – С. 345–361. – EDN: LJSQULU
8. Абрамов Т.А., Индрупский И.М., Гордеев А.О., Аккерман А.Ш., Киселев А.Н. Особенности проявления изменений структуры трещиноватости при повторных ГДИ после ГРП на примере сложнопостроенных коллекторов березовской свиты // Актуальные проблемы нефти и газа (в печати)

9. Свалов А.М., Абрамов Т.А., Индрупский И.М. Сокращение времени выхода на радиальный режим при проведении ГДИ для скважин со сложным заканчиванием с помощью модификации кривых давления // Георесурсы (в печати)

Статьи в других изданиях:

10. Абрамов Т.А., Гордеев А.О., Тюлькова А.И., Ягудин Р.А., Королев А.Ю. Анализ характерных особенностей результатов гидродинамических исследований скважин березовской свиты У месторождения // Научный журнал Российского Газового Общества. – 2019. – № 2. – С. 18-25
11. Абрамов Т.А. Особенности суперпозиции давления для горизонтальных скважин с МГРП как способ повышения информативности КВД // Сборник трудов VII Всероссийской молодежной научной конференции 16–18 октября 2024 г. – Москва: ИПНГ РАН, 2024. – С. 4-7