

На правах рукописи



ЯКИМОВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**ГЕОЛОГО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТРЕЩИННОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕНЕНИЯ
ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ В КАРБОНАТНЫХ
КОЛЛЕКТОРАХ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь - 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **Кашников Юрий Александрович,**
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» (г. Пермь)

Официальные оппоненты: **Губина Августа Ивановна,**
доктор геолого-минералогических наук, главный
геолог Пермского инженерно-технического
центра «Геофизика» (г. Пермь)

Распопов Алексей Владимирович,
кандидат технических наук, заместитель
директора по научной работе в области
разработки филиала ООО «ЛУКОЙЛ-
Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» (г. Пермь)

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный
университет» (г. Тюмень)

Защита состоится «20» декабря 2018 г. в 16.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 999.207.02 в ФГБОУ ВО «Пермский государственный
национальный исследовательский университет» по адресу: 614990, г. Пермь, ул.
Букирева 15, зал заседаний Учёного совета.

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

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

Автореферат разослан «___» _____ 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



О.Ю.
Мещерякова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований

Трещиноватость является одним из основных геологических факторов, определяющих фильтрационные свойства коллектора карбонатных объектов.

В контексте большинства исследований изучаются, прежде всего, направление, густота и раскрытость трещин в коллекторе. При этом раскрытость рассматривается как постоянный параметр.

Как правило, при разработке нефтяных и газовых залежей пластовое давление как в призабойной зоне скважин, так и в целом по залежи, особенно в начальные периоды, заметно снижается. Снижение пластовых и забойных давлений приводит к росту эффективных напряжений, действующих на стенки трещин, что приводит уменьшению их раскрытости, и, как следствие, к значительному снижению проницаемости трещин. Таким образом, трещинную проницаемость следует рассматривать как динамический параметр. При этом величина конечного сжатия трещины определяется не только величиной повышенного эффективного давления, но и прочностными свойствами породы, вмещающей данную трещину, а также степенью выветрелости ее стенок и ее начальным раскрытием.

Неверный учет данного явления на этапе геологического обоснования разработки или его игнорирование может привести к существенным погрешностям при оценке технико-экономических показателей разработки залежей углеводородов.

Диссертационная работа посвящена изучению связи деформационных процессов трещин в продуктивном пласте, вызванных действием повышенных эффективных напряжений, с геолого-геомеханическими и геофизическими факторами, влиянием их на изменение фильтрационно-емкостных свойств горных пород с целью учета этих изменений при геологическом обеспечении разработки нефтяных и газовых месторождений.

Объект исследования. Объектом исследования являются карбонатные трещинные коллектора Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ), Юрубчено-Тохомского нефтяного месторождения, газоконденсатного месторождения Адамташ (Республика Узбекистан).

Предмет исследования. Изменение фильтрационных свойств трещинных коллекторов при воздействии повышенных эффективных напряжений, возникающих вследствие снижения пластового давления. Связь интенсивности этих изменений с геолого-геофизическими параметрами.

Целью работы является повышение эффективности геологического обеспечения разработки нефтяных и газовых залежей в трещинно-поровых

карбонатных коллекторах за счёт учёта изменения трещиной проницаемости при изменении пластового давления в пласте в процессе его разработки.

Основная идея работы: повышение эффективности геологического обеспечения разработки нефтяных и газовых залежей достигается за счет выявления зависимостей коэффициентов сжимаемости трещин от геолого-геофизических параметров на основе лабораторных испытаний керна и гидродинамических и геофизических исследований скважин с последующим учётом полученных зависимостей в гидродинамическом моделировании.

Задачи исследований:

- На основе проведения экспериментальных исследований изменения проницаемости образцов керна с трещинами в процессе падения и восстановления пластового давления установить зависимости между параметрами снижения трещинной проницаемости и геолого-геофизическими характеристиками породы коллектора.
- Выполнить анализ результатов промысловых исследований скважин с целью выявления наличия эффекта влияния изменения пластового давления на трещинную проницаемость коллектора, а также оценить степень влияния этого эффекта на продуктивность скважин.
- Разработать аналитические зависимости изменения фильтрационно-емкостных свойств пласта при снижении пластового давления, а также методику учёта эффекта снижения трещинной проницаемости коллектора в гидродинамических расчётах.
- Посредством проведения гидродинамических расчётов с использованием разработанной методики учёта изменения трещинной проницаемости оценить влияние эффекта снижения трещинной проницаемости на процесс разработки для исследуемых продуктивных объектов.

Методы исследований включали в себя экспериментальные исследования образцов керна, анализ гидродинамических исследований скважин, программирование на языках Matlab и Pascal, гидродинамическое моделирование в симуляторе Eclipse.

Научная новизна работы:

1. Впервые установлено, что кривая снижения проницаемости образцов керна с трещинами при первичной нагрузке аппроксимируется уравнением смыкания трещины Бартона-Бандиса. Кривые изменения проницаемости при разгрузке и повторной нагрузке аппроксимируются прямой линией.

2. Для образцов с трещинами Юрубчено-Тохомского месторождения и месторождения Адамташ впервые получены корреляционные

зависимости, связывающие параметры снижения проницаемости с интервальным временем пробега продольной волны, начальной проницаемостью в пластовых условиях и плотностью образцов. Для АГКМ на основе обработки данных ГДИ скважин установлена зависимость параметра, характеризующего степень изменения проницаемости в процессе падения пластового давления, от величины начальной проницаемости.

3. В результате проведенных аналитических исследований, испытаний образцов с трещинами, а также анализа геофизических и гидродинамических исследований были получены параметры геолого-геомеханической модели для описания изменения проницаемости, позволяющие определить полный набор деформационных кривых трещин для произвольных циклов падения и восстановления внутривещного давления.

Практическая значимость работы:

1. Установлены основные закономерности изменения трещинной составляющей проницаемости объектов трещинного и порово-трещинного типа Юрубчено-Тохомского нефтяного месторождения и газоконденсатного месторождения Адамташ.

2. Разработан алгоритм учета снижения проницаемости как по залежи в целом, так и в прибойной зоне скважин порово-трещинных объектов в геолого-гидродинамическом моделировании и выполнена его реализация в виде дополнительного программного модуля, работающего параллельно с расчётом в гидродинамическом симуляторе «Eclipse».

3. С использованием полученных уравнений и разработанного программного обеспечения по учету изменения проницаемости произведены гидродинамические расчёты прогнозных вариантов разработки Юрубчено-Тохомского месторождения и месторождения Адамташ.

Основные научные положения, защищаемые автором:

1. Зависимости геомеханических параметров сжимаемости трещин от геофизических и геологических параметров, полученные на основе результатов испытаний образцов керна с трещинами.

2. Параметры сжимаемости трещинных коллекторов, полученные на основе анализа гидродинамических и геофизических исследований скважин.

3. Учёт эффекта снижения проницаемости по залежи в целом и в прибойной зоне в процессе гидродинамического моделирования на основе разработанных аналитических зависимостей, учитывающих геолого-геомеханические особенности деформирования карбонатных коллекторов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается значительным объёмом компрессионных испытаний с трещинными образцами керна, соответствием реальных индикаторных диаграмм скважин модельным, проведением тестовых гидродинамических расчётов.

Реализация работы

Результаты данного диссертационного исследования были учтены при создании гидродинамических моделей Юрубчено-Тохомского месторождения и месторождения Адамташ.

Апробация работы

Основные результаты работы представлены на XII международной научно-технической конференции «Мониторинг разработки нефтяных и газовых месторождений: разведка и добыча» (Томск, 2013г), на XIV научно-практической конференции «Геология и разработка месторождений с трудно-извлекаемыми запасами» (Анапа, 2014г), на 9-м Азиатском симпозиуме по механике горных пород (Бали, 2016г), на научно-технических советах ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», ООО «Газпром добыча Астрахань», ООО «ЛУКОЙЛ Узбекистан Оперейтинг Компани», на научно-техническом совете Горно-нефтяного факультета ПНИПУ.

Фактический материал

В работе были использованы следующие основные материалы и данные:

- Результаты компрессионных испытаний образцов керна с трещинами из интервалов коллектора Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ), Юрубчено-Тохомского месторождения, месторождения Адамташ,
- Исходные данные по материалам гидродинамических исследований скважин по этим месторождениям,
- Материалы подсчёта запасов и проектные документы,
- Данные геофизических исследований скважин,
- Данные 3Д сейсмики,
- Данные по истории добычи скважин АГКМ,
- Геологические и гидродинамические модели рассматриваемых объектов.

Публикации

Основные положения диссертационной работы отражены в 5 научных работах, опубликованных в журналах, входящих в список ВАК. Из них одна статья в издании, индексированном в международных базах цитирования GeoRef, Web of Science, две статьи в изданиях, индексированных в международной базе цитирования Scopus.

Объём работы и ее структура.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Текст изложен на 127 страницах машинописного текста, иллюстрирован 66 рисунками и содержит 11 таблиц. Список литературы включает 104 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрены основные методы исследований эффекта снижения трещинной проницаемости при снижении пластового давления в коллекторе и геолого-физическая характеристика объектов, на которых проводились исследования.

На настоящий момент вопрос о влиянии снижения трещинной проницаемости на параметры работы скважин анализируется во многих работах как отечественных, так и зарубежных исследователей. При этом можно выделить несколько основных направлений в данной области.

Первая группа исследований представляет собой испытания образцов керна с трещиной, направленные на анализ смыкания трещины под действием нормальных и касательных напряжений. В данном направлении работали N. Barton, S. Bandis, W. Lechnitz, J. Erban, Y. Cho, S. Jones, J. Rutqvist, M. Zoback, Кашников Ю.А. и др. В результате этих исследований N. Barton и S. Bandis получили основополагающие уравнения, описывающие процесс смыкания трещины под действием нормальных и касательных напряжений.

Вторая группа исследований посвящена исследованию распределения открытых трещин и их смыкания при изменении пластового давления непосредственно по результатам гидродинамических исследований скважин и промысловым данным. Можно отметить работы таких исследователей как Викторин В.Д., Некрасов А.С., Щипанов А.Н., Лебединец Н.Р., Гладков Е.А., Майдебор В.Н., Добрынин В.М., Перепеличенко В.Ф., Котяхов Ф.И. и др. В их трудах получены параметры снижения трещинной проницаемости, основанные на гипотезе раскрытия таких трещин, для которых пластовое давление превышает боковое горное давление.

Наконец, известны выдающиеся работы Баренблатта Г.И., Желтова Ю.П., J. Warren, P. Root, которые предложили модель среды с двойной пористостью, которая описывает процессы массообмена между трещинами и поровой средой. Данная модель впоследствии была реализована в современных пакетах гидродинамического моделирования, таких как «Eclipse» и «Tempest More», которые позволяют решать задачи разработки

объектов трещинно-порового типа. Снижение трещинной проницаемости в целом по залежи в данных пакетах учитывается, введением соответствующих таблиц.

Следует отметить, что исследователи не анализируют зависимость параметров сжимаемости трещин и, соответственно, изменение трещинной проницаемости от геолого-геофизических факторов, таких как проницаемость при начальном пластовом давлении, скорость продольной волны, плотность. Тем самым, не привязывается изменение параметров сжимаемости трещинно-поровых и трещинных продуктивных объектов к геолого-геофизическим характеристикам месторождения. В связи с этим в данном диссертационном исследовании был осуществлён поиск связи параметров смыкаемости трещин с геолого-геофизическими характеристиками разреза. Помимо этого в ходе выполнения работы был разработан и опробован новый подход учёта эффекта снижения проницаемости по залежи в целом и в околоскважинной зоне в процессе гидродинамического моделирования.

Геологические аспекты строения рассматриваемых месторождений

Исследования в рамках данной работы выполнены на примере Юрубчено-Тохомского нефтегазового месторождения, Астраханского газоконденсатного месторождения и газоконденсатного месторождения Адамташ (Респ.Узбекистан). Выбор данных месторождений в качестве объекта исследований обусловлен значительной долей трещинной составляющей проницаемости в общей проницаемости коллектора.

Астраханское газоконденсатное месторождение находится в юго-западной бортовой части Прикаспийской нефтегазоносной провинции. Основная газоносность месторождения приурочена к прикамскому, северо-кельтменскому, краснополянскому горизонтам башкирского яруса. Внутреннее строение продуктивной башкирской толщи характеризуется пластовым распространением пористых, слабо пористых и, в меньшей степени, плотных разностей карбонатных пород с тонкими прослоями аргиллитов. Вся толща пород пронизана макро- и микротрещинами. По материалам керна и исследований скважин установлены относительно невысокие фильтрационные свойства матрицы карбонатных пород. Наличие высоких дебитов при сравнительно низкопористом разрезе для ряда скважин свидетельствует о существенной роли трещиноватости в обеспечении проницаемости разреза.

Юрубчено-Тохомское месторождение в административном отношении расположено в пределах Эвенкийского района Красноярского края. Нефтеносность связана с рифейскими отложениями.

В общем виде рифейский резервуар представлен непроницаемыми блоками (матрицей) с неэффективной пористостью (в среднем 0.8 %),

системой преимущественно субвертикальных трещин и субгоризонтальными кавернозными интервалами. Продуктивность скважин определяется сочетанием зон развития кавернозных интервалов с интенсивной вертикальной трещиноватостью.

Характеристики трещиноватости изучены по данным исследований FMI, а также по материалам исследований керна.

Газоконденсатное месторождение Адамташ административно располагается на территории республики Узбекистан. Газоконденсатная залежь приурочена к горизонтам XV, XVa и XVI верхнеюрской нефтегазоносной формации. XV горизонт представлен переслаиванием ангидритов и доломитизированных известняков. По результатам анализа обобщённых лабораторных исследований керна и материалов ГИС установлено наличие двух типов коллектора, отличающихся по своим фильтрационно-емкостным свойствам (ФЕС): трещинно-поровый и порово-трещинный. Характеристики трещиноватости изучены по данным исследований FMI по 15 скважинам, а также по материалам исследований керна.

Во второй главе рассматриваются аналитические и экспериментальные исследования изменения трещинной проницаемости карбонатных горных пород при изменении давления в залежи

Аналитическое представление изменения фильтрационно-емкостных свойств пласта при снижении пластового давления.

В пластовых условиях коллектора на стенки трещины оказывает сжимающее воздействие горное давление, которое стремится сомкнуть стенки трещины. Ему противодействуют силы упругости в месте контакта шероховатых стенок трещины, а также существующее пластовое давление. В процессе выработки запасов пластовое давление уменьшается. При этом эффективное давление, действующее на стенки трещины, возрастает, и происходит частичное смыкание трещины.

В работе были рассмотрены два вида аналитического представления зависимости проницаемости от пластового давления.

В настоящее время наиболее часто при описании процесса снижения проницаемости любого вида коллектора используют экспоненциальный закон:

$$k_{тр} = k_{тр0} \cdot e^{\beta(p_0 - p)}, \quad (1)$$

где $k_{тр0}$ – проницаемость пласта при начальных пластовых условиях,

p_0 – начальное пластовое давление,

β – сжимаемость породы.

Чем больше β – тем сильнее снижается проницаемость (рисунок 1.а).

Второй способ аналитического представления [2, 3] представляет собой развитие идей Н. Бартон и С. Бандиса, которые на основе результатов большого количества экспериментального материала показали, что зависимость раскрытия трещин от действующих напряжений является существенно нелинейной и лучше всего описывается функцией вида

$$\Delta\delta = \frac{\sigma_n \cdot \sigma_m}{S_{n,0} \cdot \delta_m + \sigma_n}, \quad (2)$$

где $\Delta\delta$ - величина сжатия (смыкания) берегов трещины под действием нормальных напряжений σ_n ; δ_m - максимально возможное сжатие берегов трещины; $S_{n,0}$ - начальная жесткость трещины, зависящая от прочностных характеристик породы, а также от шероховатости и степени выветрелости её стенок.

Текущее раскрытие трещины δ находится как $\delta = \delta_0 - \Delta\delta$, где δ_0 - начальное раскрытие. При этом $\delta_m < \delta_0$, т.е. максимально возможное сжатие трещины меньше ее начального раскрытия.

$$\delta = \delta_0 - \Delta\delta = \frac{\delta_m^2 \cdot S_{n0}}{S_{n0} \cdot \delta_m + \sigma_n}, \quad (3)$$

Зависимость раскрытия трещины от текущего пластового давления можно записать в виде

$$\delta = \delta_{\text{нач.пласт}} \cdot \frac{Ns}{Ns + p_0 - p}, \quad (4)$$

Где $Ns = S_{n0} \cdot \delta_0 + \sigma_{n,\text{нач.пласт}}$

Параметр Ns характеризует степень изменения раскрытия при изменении пластового давления. Как следует из его определения, он зависит от начальной жёсткости трещины S_{n0} , раскрытия трещины при отсутствующей нормальной нагрузке, а также значения действующего нормального напряжения.

Чем меньше параметр Ns , тем больше степень снижения раскрытия трещины (рисунок 1.б).

Если сделать допущение, что коэффициент, характеризующий шероховатость стенок трещины при ее смыкании не меняется, то получим уравнение для описания изменения проницаемости единичной трещины в виде модели смыкания трещины Бартон-Бандиса:

$$K_{\text{тр}} = K_{\text{тр}0} \cdot \frac{Ns^2}{(Ns + p_0 - p)^2}, \quad (5)$$

Исходя из определения параметра Ns , для поиска корреляционных зависимостей параметров снижения трещинной проницаемости в последующих этапах работы были выбраны такие геолого-геофизические параметры как скорость продольной волны (V_p), плотность, а также начальная проницаемость трещины.

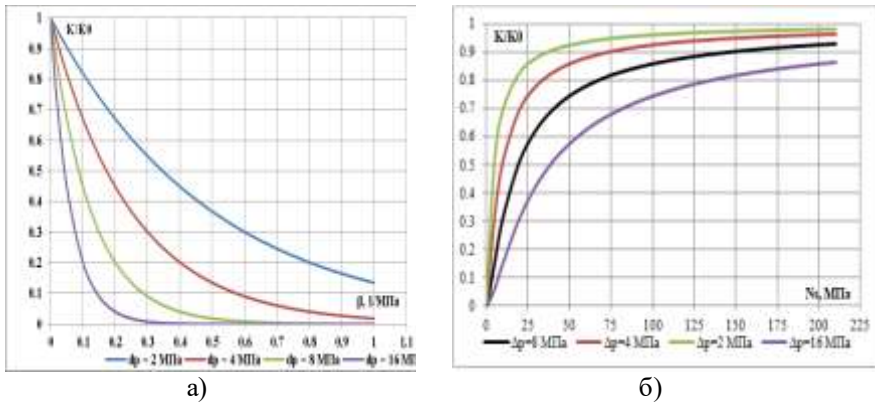


Рис. 1. Зависимость изменения проницаемости от параметров N_s и β при увеличении эффективного давления от начального пластового на 2, 4, 8, 16 МПа

При экспоненциальном виде зависимости проницаемости от давления в случае однофазной фильтрации объёмный дебит вертикальной скважины можно записать в виде:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot K_0}{\mu \cdot \ln \frac{r_k}{r_c} \cdot \beta} (e^{\beta \cdot (p_k - p_0)} - e^{\beta \cdot (p_c - p_0)}) \quad (6)$$

При использовании закона смыкания трещины Бартон-Бандиса дебит вертикальной скважины определяется по формуле:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot K_0 \cdot N_s^2}{\mu \cdot \ln \frac{r_k}{r_c}} \left(\frac{1}{N_s + p_0 - p_k} - \frac{1}{N_s + p_0 - p_c} \right) \quad (7)$$

Таким образом, в рамках данной работы изучались два геомеханических параметра, характеризующие степень смыкания трещин и, соответственно, степень изменения проницаемости трещинной среды – параметры N_s и β и их связь с геолого-геофизическими параметрами – плотностью и скоростью продольной волны, а также непосредственно с проницаемостью. Отметим, что до настоящего времени данных исследований не проводилось.

Для определения параметров N_s и β были проведены лабораторные испытания образцов с трещинами и монолитных образцов карбонатных объектов АГКМ, нефтегазового Юрубчено-Тохомского месторождения, газоконденсатного месторождения Адамташ [1, 3].

Все образцы были выпилены из кусков керна с естественными трещинами. Каждый образец выпиливался так, чтоб трещина проходила через оба торца образца.

Каждое испытание представляет собой последовательность нагрузок и разгрузок, прикладываемых к образцу. Величина повышенных эффективных давлений подбиралась исходя из ожидаемых величин снижения пластового давления, а также создаваемых в скважинах депрессий. В обобщенном виде программа испытаний заключалась в следующем.

1. Перед проведением испытаний все образцы были отторцованы и проэкстрагированы. Было проведено лабораторное определение их пористости, проницаемости, плотности в атмосферных условиях.

2. На втором этапе создавалось в образце начальное эффективное напряжение, соответствующее природному напряжению для условий залежи. При заданных начальных пластовых условиях образец выдерживался до полной стабилизации проницаемости и пористости.

3. Уменьшением внутрипорового давления в образце воспроизводилось увеличение действующего на него эффективного напряжения. При действующем эффективном напряжении образец выдерживался до полной стабилизации проницаемости и пористости.

4. Увеличением внутрипорового давления до начального пластового производился этап разгрузки образца.

5. Этапы 3 и 4 повторяются в зависимости от условий эксперимента с разными значениями повышенных эффективных напряжений.

Величины повышенных эффективных напряжений выбирались исходя из ожидаемых рабочих депрессий и прогнозного снижения пластового давления.

Длительность испытаний каждого образца определялась скоростью стабилизации значения проницаемости на каждом режиме и составила для большинства образцов от 24 до 48 часов.

В результате получается ряд кривых снижения проницаемости образцов с трещинами при первичной нагрузке и ряд кривых изменения проницаемости при разгрузке и повторной нагрузке.

На рис. 2 представлен график изменения проницаемости при нагрузках и разгрузках образца 17-1 Юрубчено-Тохомского месторождения.

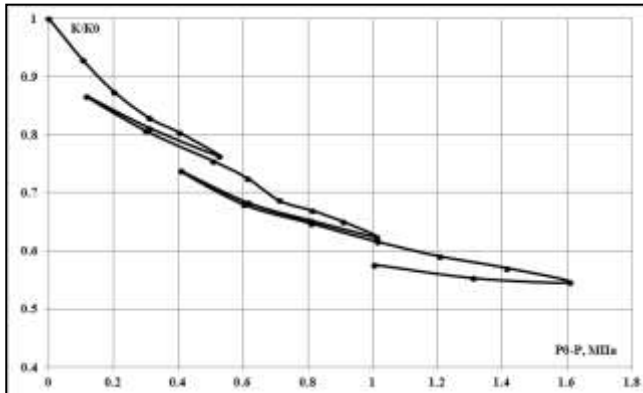


Рис. 2. Результаты испытания образца 17-1 Юрубчено-Тохомского месторождения.

При теоретической обработке результатов проведенных компрессионных испытаний трещинных образцов керна были определены значения геолого-геомеханических параметров N_s и β , отвечающих за изменение проницаемости при падении пластового давления в модели трещины Бартона-Бандиса и в экспоненциальной модели. В последующем были получены корреляционные зависимости для Юрубчено-Тохомского месторождения и месторождения Адамташ, связывающие геомеханические параметры снижения проницаемости со скоростью продольной волны (рис. 3, 4), начальной проницаемостью в пластовых условиях и плотностью образцов.

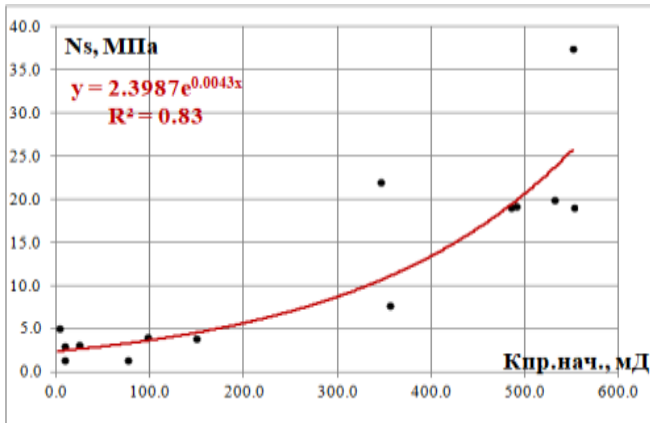


Рис.3. Зависимость параметра N_s от начальной проницаемости образца в пластовых условиях для образцов Юрубчено-Тохомского месторождения.

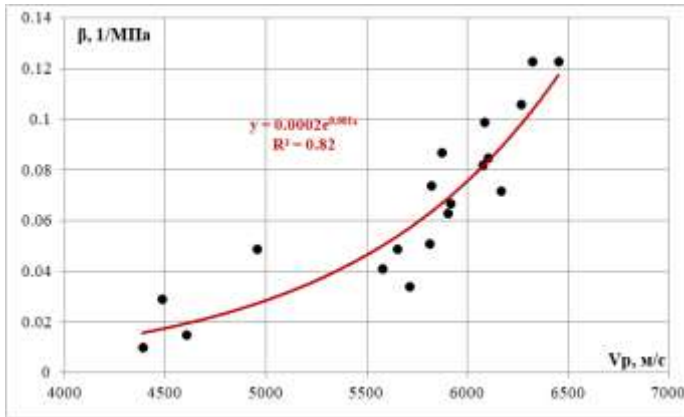


Рис. 4. Зависимость параметра β от скорости продольной волны для образцов месторождения Адамташ.

В результате лабораторных экспериментов над трещинными образцами керна впервые установлено, что кривая снижения проницаемости образцов с трещинами при первичной нагрузке аппроксимируется не только известной экспоненциальной зависимостью, но и уравнением смыкания трещины Бартона-Бандиса. Кривые изменения проницаемости при разгрузке и повторной нагрузке аппроксимируются прямой линией. Таким образом, в результате интерпретации и анализа результатов проведенных испытаний была получена модель, позволяющая определить полный набор деформационных кривых трещин для произвольных циклов падения и восстановления внутрипорового давления при использовании геолого-геофизических параметров: скорости продольной волны, плотности и начальной проницаемости.

Полученные модели снижения проницаемости в дальнейших главах работы будут применены для учёта эффекта снижения проницаемости при интерпретации гидродинамических исследований скважин на стационарных режимах, а также в процессе гидродинамического моделирования. При этом более предпочтительным является использование зависимости параметров снижения проницаемости от таких геолого-геофизических параметров как плотность и скорость продольной акустической волны. При использовании зависимости параметров снижения проницаемости от начальной проницаемости, необходимо знать характер распределения трещин в пласте. Одна и та же проницаемость в скважине, определенная по результатам гидродинамических испытаний,

может быть обусловлена как системой трещин с большой плотностью трещин, но малым их раскрытием, так и системой с малой плотностью трещин, но большим раскрытием. При этом в зависимости от принятого значения раскрытия трещин параметры снижения трещинной проницаемости β и N_s будут отличаться. Использование зависимости β и N_s от скорости продольных акустических волн или плотности породы снимает эту неоднозначность.

Таким образом, проведенные эксперименты на образцах с трещинами по определению закона снижения проницаемости подтвердили первое защищаемое положение.

Третья глава посвящена исследованию проявлений деформаций коллекторов на основе промысловых данных

Исследования проявлений деформаций продуктивных объектов трещинно-порового типа по промысловым данным также были выполнены для карбонатных объектов АГКМ, нефтегазового Юрубчено-Тохомского месторождения, месторождения Адамташ.

Астраханское газоконденсатное месторождение.

Анализ всей совокупности исследований на стационарных режимах по всем скважинам АГКМ за период времени от начала разработки до 2015 года для большинства скважин показал, что для большинства определений изменение проницаемости в пределах одного испытания носит несущественный характер в связи с относительно малым временем выдержки для условий Астраханского газоконденсатного месторождения под высоким эффективным давлением.

В связи с этим переинтерпретация каждой диаграммы производилась в предположении постоянной не меняющейся в пределах каждой индикаторной диаграммы проницаемости, но при этом меняющихся PVT свойств газа.

Всего в обработке участвовало 164 скважины, в среднем по 17 диаграмм в каждой из них. При обработке для каждой диаграммы с помощью численных методов подбирался параметр проницаемости. Для анализа выбирались временные участки, на которых не проводились геологотехнические мероприятия. Дальнейшее рассмотрение динамики определенной проницаемости для большинства скважин показало ее зависимость от величины снижения среднего забойного давления вида:

$$k = k_0 \cdot \exp^{\beta \cdot (p_0 - p_{\text{заб}})}.$$

Для полученных значений k_0 и β была построена зависимость (рис. 5).

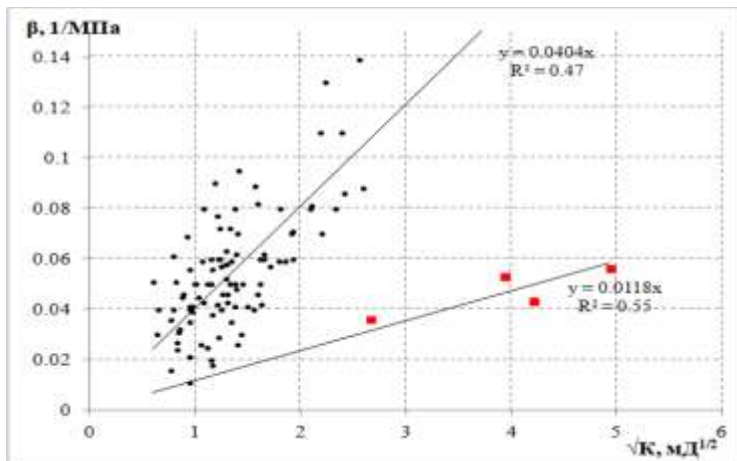


Рис. 5. Зависимости параметра β , характеризующего степень изменения проницаемости пород-коллекторов АГКМ в процессе падения пластового давления, от величины проницаемости.

Как видно, на рисунке выделяются две характерные зависимости: одна для высокодебитных скважин с проницаемостью свыше 7 мД, другая для остальных скважин, исходная проницаемость которых ниже 7 мД. При этом высокодебитные скважины (цветные точки на рис. 5) характеризуются меньшим по абсолютной величине параметром снижения проницаемости β .

Зоны, которые вскрыты такими высокодебитными скважинами, представлены зонами дробления пород, наличием проницаемых разломов с берегами с высокой степенью шероховатости, за счет чего сжимаемость в таких зонах незначительна и несущественно превосходит сжимаемость ненарушенной породы. Данный геолого-геомеханический эффект был обнаружен при испытаниях образцов с трещинами Юрубчено-Тохомского месторождения и месторождения Адамташ. На образцах, где присутствовали раскрытые трещины со смещением и высокой шероховатостью берегов и, соответственно, высокой проницаемостью, проницаемость уменьшалась не столь существенно, как на образцах с меньшей раскрытостью трещин и меньшей проницаемостью.

Юрубчено Тохомское месторождение

С учётом рассмотренных выше аналитических представлений о смыкании трещин в коллекторе были обработаны 29 индикаторных диаграмм вертикальных скважин рифейской залежи месторождения [5]. Большинство рассмотренных индикаторных диаграмм носит

криволинейный характер, что объясняется смыканием трещин в районе воронки депрессии, а также влиянием выделившегося газа при снижении пластового давления в околоскважинном пространстве ниже давления насыщения. В процессе обработки учитывались оба этих фактора. В результате интерпретации для каждой скважины были определены коэффициенты β и N_s , характеризующие степень снижения проницаемости.

После переинтерпретации диаграмм была построена зависимость величины β от скорости продольной волны акустического каротажа в интервале перфорации скважины. В зависимости участвовали скважины, для которых имелись кривые акустического каротажа в интервале перфорации.

Форма полученной кривой в целом соответствует кривой, определенной в результате компрессионных испытаний образцов керна и подтверждает вывод из главы 2: для скважин с наибольшим средним значением скорости продольной волны акустического каротажа в интервале перфорации характерно наибольшее снижение проницаемости. (рис. 6)

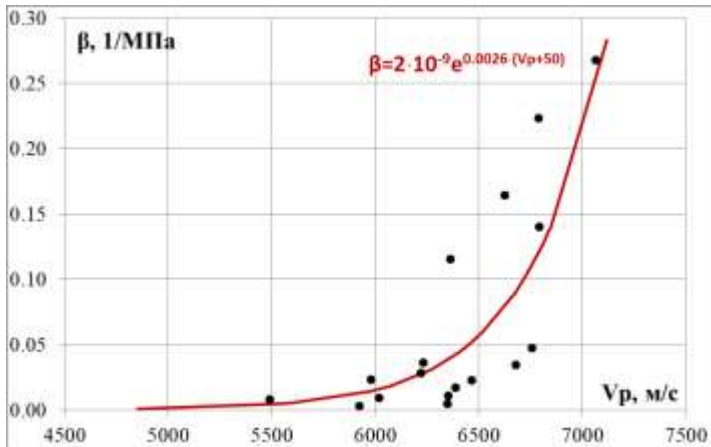


Рис. 6. Зависимость параметра β , определенного из ГДИ скважин Юрубчено-Тохомского месторождения, от скорости продольной волны данным акустического каротажа в интервале перфорации.

Полученная зависимость β от V_p позволяет при наличии данных акустического каротажа и 3D сейсмике прогнозировать изменение проницаемости пласта при снижении пластового давления в процессе разработки залежи.

Месторождение Адамташ

С целью определения степени влияния эффекта снижения проницаемости на закон фильтрации были переобработаны 13 индикаторных диаграмм скважин месторождения. При интерпретации были учтены такие искривляющие форму индикаторной кривой факторы как наличие инерционной составляющей в законе фильтрации в связи с высокими скоростями фильтрации, изменение PVT свойств флюидов при изменении внутрипорового давления, фактор смыкания трещин при снижении внутрипорового давления.

Для двухчленного закона фильтрации, часто применяемого при анализе испытаний газовых скважин, фактор инерционной составляющей в законе фильтрации и фактор снижения трещинной проницаемости аналитически неразделимы. Поэтому для данного месторождения коэффициент снижения проницаемости β для каждой скважины был определён по корреляционной зависимости от скорости продольной волны акустического каротажа, полученной в результате обработки испытаний керна.

При этом подобранные в результате данной переинтерпретации значения коэффициентов динамического скин-фактора (D фактора) оказались существенно меньше, чем для значений, полученных при обработке диаграмм без учёта эффекта снижения проницаемости.

На рис. 7 приведена зависимость данной разницы в значениях параметра D-фактора от параметра снижения проницаемости β .

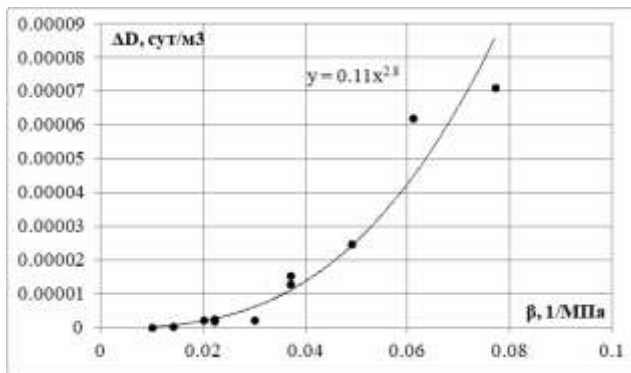


Рис. 7. Зависимость эквивалентного добавочного D-фактора от параметра снижения проницаемости β

Полученная зависимость применялась в процессе последующего гидродинамического моделирования для учёта дополнительного изменения проницаемости в районе воронки депрессии.

В результате выполненного анализа результатов гидродинамических исследований скважин на установившихся режимах фильтрации использован общий системный подход, позволяющий учесть наличие фактора снижения трещинной проницаемости при снижении пластового в ходе интерпретации. Основная суть данного подхода: последовательно учесть действие всех факторов, искривляющим образом влияющих на форму индикаторной диаграммы. Оставшийся после учёта всех основных факторов эффект – интерпретировать как влияние смыкания трещин.

Таким образом, по результатам исследований проявлений деформаций объектов трещинно-порового типа по промысловым данным получены параметры сжимаемости трещин и их зависимости от геолого-геофизических характеристик пласта, что подтвердило второе защищаемое положение.

Аналитические зависимости параметров снижения проницаемости, полученные при анализе результатов компрессионных исследований и гидродинамических исследований скважин, позволяют учесть данный эффект при геолого-гидродинамическом моделировании, а также прогнозировать изменение проницаемости при снижении пластового давления в процессе разработки залежи, то есть рассматривать проницаемость в процессе эксплуатации залежи как динамический параметр (рис. 8).

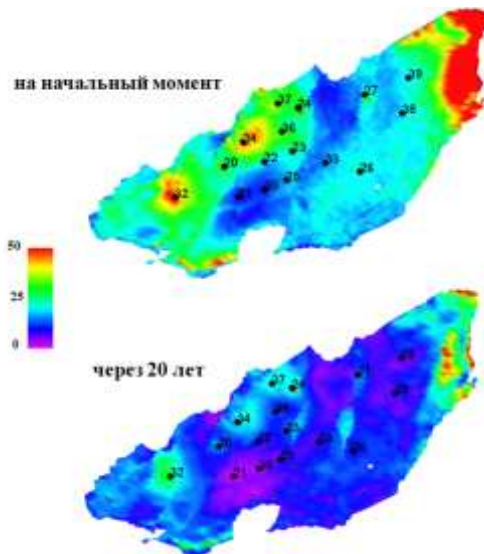
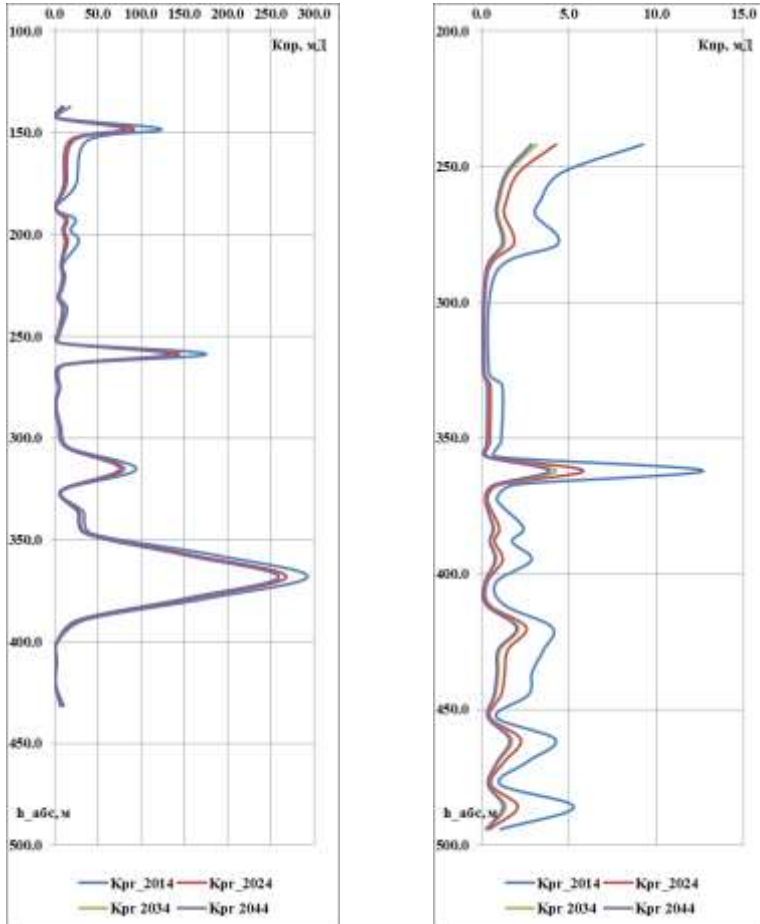


Рис. 8. Прогноз изменения проницаемости для продуктивных объектов месторождения Адамташ.

На рис.9 представлено прогнозное снижение проницаемости в процессе падения пластового давления по двум скважинам месторождения Адамташ, посчитанное по разрезу скважины.



($\beta=0.01$ МПа-1)

($\beta=0.063$ МПа-1)

Рис. 9. Изменение профиля проницаемости по скважинам на начало разработки (2014), 2024, 2034, 2044 года

В главе 4 рассматривается изменение трещинной проницаемости карбонатных объектов месторождений в процессе изменения пластового давления и методика учёта деформации продуктивных объектов в процессе геолого-гидродинамического моделирования.

При учёте эффекта изменения проницаемости в гидродинамических расчётах необходимо принимать во внимание следующие составляющие процесса изменения проницаемости (рис. 10):

- снижение проницаемости в целом по залежи;
- дополнительное снижение проницаемости в околоскважинной зоне.



Рис. 10 - Реализация учёта изменения проницаемости в существующих гидродинамических симуляторах.

Кроме того, необходимо учитывать неоднородность распределения параметра снижения проницаемости, как по площади, так и по разрезу.

В современных гидродинамических симуляторах не учитывается дополнительное снижение проницаемости в околоскважинной зоне, а для всей залежи обычно принят единый закон изменения проницаемости всей залежи.

В связи с этим была разработана и опробована методика учёта эффекта снижения проницаемости по залежи в целом и в околоскважинной зоне в процессе геолого-гидродинамического моделирования на основе разработанных аналитических зависимостей, учитывающих геолого-геомеханические особенности деформирования карбонатных коллекторов.

Основные положения предложенной методики:

1. Ранжированием параметра V_p весь куб гидродинамической модели разбивается на регионы (от 20 до 30 регионов). Для каждого региона задаётся свой закон изменения множителя проницаемости ячейки от пластового давления. При этом значение параметров β или N_s для каждого региона, находится по зависимости от среднего V_p в этом регионе.

2. Учитывается дополнительное снижение проницаемости в околоскважинной зоне

При выполнении работы снижение проницаемости, связанное с падением пластового давления по всей залежи, в пакете Eclipse моделировалось заданием таблиц изменения проницаемости ключевым словом ROCKTAB.

Учёт дополнительного снижения проницаемости в околоскважинной зоне при выполнении работы осуществлялся двумя методами:

- использованием внешнего по отношению к гидродинамическому симулятору приложения, учитывающего данный эффект;
- методом замены данного эффекта другим эффектом, дающим в условиях эксплуатации аналогичный результат (введением дополнительного D-фактора).

Для учёта дополнительного снижения проницаемости происходящего в околоскважинной области был написан внешний программный модуль, который запускается параллельно с расчётом в Eclipse и на каждом расчётном шаге вычисляет и корректирует сообщаемость системы «ячейка – пласт». Блок-схема расчёта гидродинамической модели с учётом дополнительного снижения проницаемости в околоскважинной зоне, реализованного во внешнем программном модуле, представлена на рис. 11.

Отладка алгоритма производилась на модельной задаче отработки одиночной скважины с постоянным дебитом в условиях истощения залежи.

На рис. 12 представлены результаты модельных расчётов. Точкам соответствует аналитическое решение процесса работы скважины с постоянным дебитом с учётом эффекта снижения проницаемости. Штрихом обозначено модельное решение без учёта дополнительного снижения проницаемости в околоскважинной зоне в ячейке модели. Сплошной линией представлен результат расчёта с применением внешнего программного модуля.

Юрубчено-Тохомское месторождение.

С помощью представленного выше приёма было выполнено гидродинамическое моделирование разработки участка Юрубчено-Тохомского месторождения [4]. Из-за отсутствия промысловых данных по месторождению оценка адекватности алгоритма проводилась по индикаторным диаграммам путём их воспроизведения. Параметр N_s при этом для каждой ячейки модели задавался по зависимости параметра от скорости продольной волны, полученной из обработки 3D сейсмике и данных ГИС.

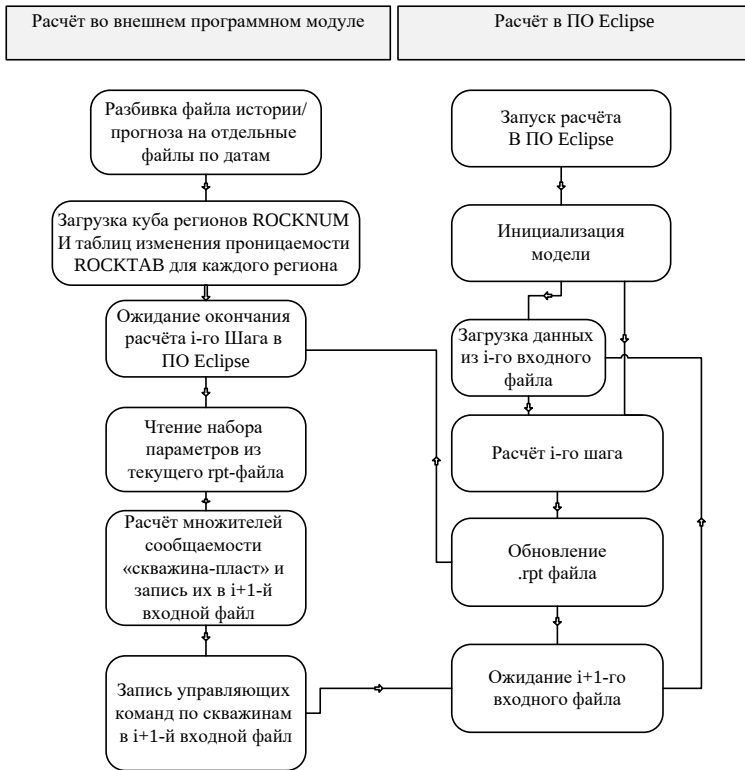


Рис. 11. Алгоритм методики учёта дополнительного снижения проницаемости в окоскважинной зоне, реализованной во внешнем программном модуле.

Всего были промоделированы индикаторные диаграммы по 18 скважинам, из которых 11 вертикальные. В качестве граничных условий при этих расчетах задавался фактический дебит скважин из индикаторных диаграмм, а полученная в результате гидродинамического расчёта депрессия сравнивалась с фактической депрессией из ГДИС.

После воспроизведения фактических индикаторных диаграмм скважин были произведены прогнозные расчёты, учитывающие эффект снижения проницаемости.

Сравнение уровней добычи нефти для вариантов по результатам гидродинамического моделирования с учётом и без учёта эффекта изменения проницаемости приведены на рисунке 13.

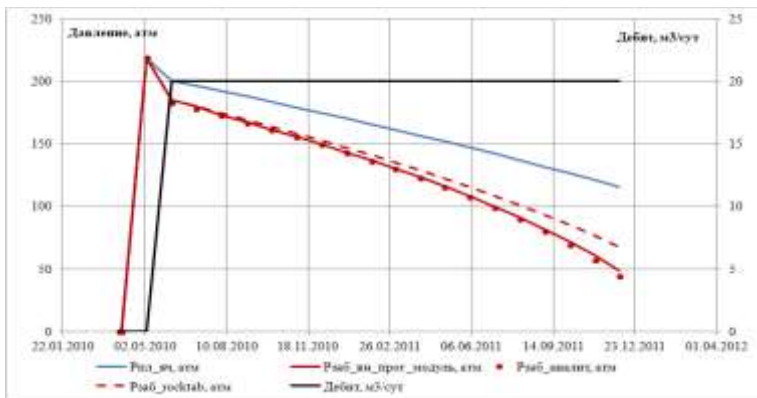


Рис. 12. Модельная задача, демонстрирующая влияние внешнего программного модуля на результат моделирования.



Рис. 13. Сравнение результатов расчётов с учётом и без учёта изменения проницаемости для участка Юрубчено-Тохомского месторождения

Согласно результатам проведённых расчётов, учёт снижения проницаемости приводит к сокращению длительности уровня постоянной добычи для моделируемого участка на 3 года.

Месторождение Адамташ.

Также было выполнено гидродинамическое моделирование разработки месторождения Адамташ. Согласно действующему проектному документу эксплуатационный объект данного месторождения предполагается

разрабатывать в режиме истощения пластовой энергии преимущественно при газовом режиме с проявлением упруговодонапорного режима.

Существующая гидродинамическая модель месторождения Адамташ является композиционной. Поэтому подход, где для моделирования дополнительного снижения проницаемости в районе воронки депрессии используется внешний программный модуль, для нее не применим из-за программных ограничений ПО Eclipse.

В связи с этим учёт дополнительного снижения проницаемости в призабойной зоне производился методом замены этого эффекта другим эффектом, дающим в условиях эксплуатации аналогичный результат. В качестве заменяющего эффекта была выбрана добавка к D-фактору.

Параметр β для всех ячеек 3D модели был посчитан по зависимости данного параметра от скорости продольной волны V_p , полученной в результате компрессионных испытаний образцов керна.

Результаты расчетов базового варианта разработки месторождения с учетом эффекта снижения трещинной проницаемости при падении пластового давления показали, что при учёте изменения проницаемости в процессе падения пластового давления заданный групповой уровень добычи газа перестаёт выдерживаться на один год раньше, чем без учёта этого фактора, при этом накопленная добыча газа на дату окончания разработки остаётся неизменной. В данном случае можно сказать, что учёт снижения проницаемости не ведет к существенному эффекту.

Данный факт можно объяснить значительными технологическими ограничениями, накладываемыми на скважины, такими как максимальная скорость потока газа на устье, в связи с чем согласно действующему проектному документу скважины предполагается эксплуатировать на небольших депрессиях.

Т.о., результаты гидродинамического моделирования на основе разработанного алгоритма учета проявлений деформаций продуктивных объектов трещинно-порового типа подтвердили третье защищаемое положение.

Основные результаты исследований

Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. В результате проведенных испытаний образцов керна с трещинами была получена геолого-геомеханическая модель снижения трещинной проницаемости, позволяющая определить полный набор деформационных кривых трещин для произвольных циклов падения и восстановления внутрипорового давления при использовании геолого-геофизических характеристик - скорости продольной волны, плотности и проницаемости.

2. На основе анализа индикаторных диаграмм по рассмотренным месторождениям с учётом эффекта смыкания трещин был определен параметр снижения проницаемости. Получена зависимость этого параметра также от геолого-геофизических характеристик: скорости продольной волны по данным акустического каротажа в интервале перфорации и проницаемости.

3. Разработана методика учёта эффекта снижения проницаемости по залежи в целом и в призабойной зоне в процессе гидродинамического моделирования на основе разработанных аналитических зависимостей, учитывающих геолого-геомеханические особенности деформирования карбонатных коллекторов.

4. С использованием полученных результатов испытаний образцов, промысловых исследований и разработанного программного обеспечения были воспроизведены нелинейные индикаторные диаграммы скважин месторождений ЮТМ и Адамташ и просчитаны соответствующие варианты разработки месторождений, учитывающие эффекты изменения проницаемости.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Геолого-геомеханическая модель Астраханского газоконденсатного месторождения / Ю.А. Кашников, С.В. Гладышев, Д.В. Шустов, **С.Ю. Якимов**, А.Ю. Комаров, О.В. Тинакин // Газовая промышленность. –2012. – № 3. – С. 29–33.

2. Ашихмин, С.Г. Теоретико-экспериментальные исследования проницаемости трещиноватых коллекторов / С.Г. Ашихмин, Ю.А. Кашников, **С.Ю. Якимов** // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. –2012. – № 3. – С. 14–24.

3. Ашихмин, С.Г. Экспериментальные и теоретические исследования изменения трещинной проницаемости коллекторов Юрубчено-Тохомского месторождения / С.Г. Ашихмин, Ю.А. Кашников, **С.Ю. Якимов** // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2013. – № 2. – С. 36–41.

4. Гидродинамическое моделирование разработки участка Юрубчено-Тохомского месторождения на основе геолого-геомеханической модели / Ю.А. Кашников, Д.В. Шустов, **С.Ю. Якимов**, Н.Б. Красильникова // Нефтяное хозяйство. –2015. – № 4. – С. 62–67.

5. Якимов, С.Ю. Учёт совместного влияния эффекта смыкания трещин и выделения газа при обработке индикаторных диаграмм нефтяных скважин / **С.Ю. Якимов** // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. –2015. – № 4. – С. 87–92.