

На правах рукописи

КАШУБА АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗВЛЕЧЕНИЯ КОНДЕНСАТА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ
КОНДЕНСАТНЫХ ОТОРОЧЕК**

Специальность 25.00.17 –

Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ухта 2011

Работа выполнена в Ухтинском государственном техническом университете.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Назаров Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Гужов Николай Александрович

кандидат технических наук
Каракчиев Эдуард Игоревич

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт проблем нефти и газа РАН

Защита состоится « 14 » октября 2011 г. в 10⁰⁰ час. на заседании диссертационного совета Д 212.291.01 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Автореферат размещен на интернет-сайте УГТУ www.ugtu.net в разделе «Диссертационный совет».

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просьба высылать по указанному адресу ученому секретарю.

Автореферат разослан « 12 » сентября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук,
профессор



Н.М. Уляшева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тематики исследований

Газоконденсатные месторождения приобретают все большую роль в связи с увеличением доли добываемого газа из таких месторождений в общей мировой структуре газодобычи. Разработка газоконденсатных месторождений в режиме истощения пластовой энергии является наиболее часто используемым способом. Этот процесс сопровождается понижением пластового давления и ретроградной конденсацией высококипящих углеводородов (конденсата) с выпадением части из них в жидкую фазу и потерей их в пластах вследствие того, что выпавший в пластах конденсат оказывается малоподвижным и практически не вовлекается в процесс фильтрации. В результате в пластах разрабатываемых месторождений остается значительная часть начальных запасов конденсата, т.е. разработка газоконденсатных месторождений на истощение обеспечивает сравнительно низкую конденсатоотдачу – 30–60 % от потенциальных запасов.

Таким образом, в разрабатываемых на истощение газоконденсатных месторождениях накоплены значительные запасы выпавшего в пласте конденсата, который при используемой системе разработки остается не извлекаемым. Традиционные вторичные методы извлечения ретроградного конденсата отличаются, с одной стороны, невысокой технологической эффективностью, с другой – низкой экономической.

Из всего вышесказанного следует, что разработка более эффективных вторичных методов добычи конденсата из истощенных газоконденсатных залежей является важной и актуальной задачей.

Цель работы

Теоретическое обоснование технологии извлечения ретроградного конденсата на завершающей стадии разработки газоконденсатных месторождений из техногенных конденсатных оторочек на основе изучения процессов гравитационного перераспределения ретроградного конденсата.

Основные задачи исследований

1. Оценка возможности сегрегационного разделения углеводородных фаз на насыпных моделях пласта путем проведения численных экспериментов.
2. Изучение возможности проявления процесса сегрегации при истощении керновой модели пласта.
3. Исследование процесса образования техногенных конденсатных оторочек при истощении газоконденсатных залежей.
4. Разработка рекомендаций по проектированию вторичной добычи ретроградного конденсата из истощенных газоконденсатных залежей.

Методы решения поставленных задач

Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования. Математические модели реализованы в программном комплексе гидродинамического моделирования «Протей», прошедшем государственную регистрацию и экспертизу ЦКР Роснедра. Методы решения включают в себя проведение многовариантных численных экспериментов, анализ и обобщение полученных результатов.

Научная новизна выполненных исследований

1. В результате проведенных численных экспериментов на фрагментарных математических моделях установлено, что остаточная водонасыщенность оказывает существенное влияние на характер и интенсивность протекания процесса сегрегации.
2. На фрагментарных математических моделях установлена возможность проявления сегрегационных процессов при истощении модели пласта.
3. Выявлено, что существенное влияние на характер гравитационного оседания жидкой углеводородной фазы в продуктивной толще оказывает темп отбора газа.
4. Впервые исследована возможность образования техногенных конденсатных оторочек при истощении газоконденсатных залежей вблизи газоводяного контакта под действием гравитационных сил.
5. На масштабных математических моделях залежей массивного и пластового типа установлена возможность образования техногенных конденсатных оторочек как при вертикальной, так и при латеральной сегрегации.

Защищаемые положения

1. Результаты математического моделирования процесса сегрегационного разделения углеводородных фаз на насыпных моделях пласта. Факторы, от которых зависит характер и интенсивность протекания процесса.

2. Закономерности процесса перераспределения конденсата при истощении керновой модели пласта, установленные в ходе численных экспериментов. Влияние темпа отбора газа из модели на характер гравитационного оседания жидкой углеводородной фазы.

3. Возможность образования техногенных конденсатных оторочек вблизи газозонового контакта в залежах массивного и пластового типа.

4. Рекомендации по проектированию вторичной добычи ретроградного конденсата из истощенных газоконденсатных залежей.

Практическая значимость результатов исследований

Разработанные рекомендации могут быть использованы для совершенствования технологии разработки газоконденсатных месторождений с высоким содержанием конденсата, разрабатываемых на режиме истощения пластовой энергии, в частности для проектирования вторичной добычи выпавшего ретроградного конденсата.

Внедрение результатов исследований

Разработанные в рамках диссертационных исследований рекомендации положены в основу отчета о НИР, выполненного по централизованной тематике ОАО «Газпром» (договор «Исследования сегрегационных процессов в истощенной газоконденсатной залежи»).

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на международных молодежных научных конференциях «Севергеоэкотех» (Ухта, март 2009, 2011 гг.); межрегиональном семинаре «Рассохинские чтения» (Ухта, 3 – 4 февраля 2011 г.); пятой молодежной научно-технической конференции «Основные проблемы поиска, освоения и обустройства нефтегазовых месторождений и пути их решения» (Оренбург, 22 апреля 2011 г.); II молодежном научно-техническом семинаре «Актуальные вопросы проектирования разработки месторождений углеводородов» (Москва, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 26 мая 2011 г.).

Публикации результатов работы

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 6 статей в журналах, которые входят в перечень рекомендованных ВАК РФ периодических изданий.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем работы составляет 160 страниц, в том числе 7 таблиц, 161 рисунок и список литературы из 151 наименования.

Благодарности

Автор глубоко признателен своему научному руководителю кандидату технических наук, доценту А.В. Назарову за помощь на всех этапах подготовки диссертационной работы. Особую благодарность автор выражает д.т.н., профессору С.Н. Закирову за советы и ценные рекомендации.

Автор выражает благодарность к.т.н., профессору А.А. Мордвинову, д.т.н. Н.В. Долгушину, а также сотрудникам кафедры РЭНГМиПГ УГТУ, отделов центра РЭМПГиБС и центра ИНПСиТМ филиала ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта за консультации и советы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность тематики диссертации, цель работы, основные задачи и методы исследований, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе проанализированы известные способы повышения конденсатоотдачи газоконденсатных месторождений, рассмотрены вторичные методы добычи конденсата из газоконденсатных залежей.

Большой вклад в изучение способов разработки газоконденсатных месторождений внесли многие ученые, в том числе: К.С. Басниев, С.Н. Бузинов, Р.И. Вяхирев, А.И. Гриценко, Н.А. Гужов, Г.Р. Гуревич, А.Г. Дурмишьян, Ю.П. Желтов, С.Н. Закиров, Г.А. Зотов, Р.М. Кондрат, Ю.П. Коротаев, Р.Д. Маргулов, В.Н. Мартос, А.Х. Мирзаджанзаде, В.А. Николаев, В.И. Петренко, Р.М. Тер-Саркисов, П.Т. Шмыгля, М. Muskat и многие другие исследователи.

Обзор предшествующих исследований в области разработки газоконденсатных месторождений с воздействием на пласт показал, что самым известным и по-

лучившим наиболее широкое распространение в промышленной практике эксплуатации газоконденсатных залежей способом повышения компонентоотдачи является способ поддержания пластового давления путем обратной закачки в пласт отсепарированного (сухого) газа – сайклинг-процесс. В зарубежной практике кроме полного сайклинг-процесса, когда в залежь возвращается весь добытый из пласта газ, применяются различные модификации этого процесса, в частности так называемый частичный сайклинг-процесс.

Сайклинг-процесс обеспечивает существенное повышение коэффициента конденсатоотдачи по сравнению с разработкой месторождения на режиме истощения за счет предотвращения (или уменьшения интенсивности) процессов retroградной конденсации пластовой смеси и вытеснения пластового (жирного) газа нагнетаемым сухим (отбензиненным) газом. Вместе с тем ему присущ и ряд существенных недостатков. В их числе в первую очередь следует отметить: сравнительно невысокий коэффициент охвата пласта вытеснением, существенную зависимость эффективности процесса от неоднородности коллекторов залежи, значительные сроки разработки месторождения, длительную консервацию промышленных запасов газа, высокие капитальные затраты и эксплуатационные расходы и, наконец, недостаточную эффективность применения в условиях пониженных пластовых давлений. При закачке сухого газа образуются целики жирного газа, происходит прорыв в эксплуатационные скважины сухого газа по отдельным высокопроницаемым и дренируемым пропласткам. Это, естественно, снижает эффективность процесса закачки сухого газа. Добыча конденсата снижается после прорыва в скважины нагнетаемого агента (при постоянном отборе газа из месторождения). Для закачки сухого газа требуются компрессоры высокого давления, что в некоторых случаях также может быть ограничивающим фактором.

Вследствие описанных выше причин, сайклинг-процесс не получил широкого распространения.

Анализ литературы показывает, что давление в газоконденсатных пластах можно также поддерживать закачкой воды. Заводнение является основным методом повышения нефтеотдачи и интенсификации разработки нефтяных месторождений. Но в практике разработки газоконденсатных месторождений оно не нашло применения. Основная причина возражений против закачки воды – опасность преждевременного обводнения добывающих скважин и защемления газа и конденсата в зафронтальной области пласта.

Также предлагается способ комбинированной закачки в пласты воды и сухого газа (разработан С.Н. Закировым, А.Н. Шандрыгиным и Т.Н. Сегин). Авторы объединили возможность достижения высокой конденсатоотдачи при сайклинг-процессе и сравнительно небольшие энергетические затраты на закачку воды по сравнению с затратами на нагнетание газа в случае заводнения пласта.

Рассмотрена закачка в пласты газоконденсатных месторождений неуглеводородных газов с целью повышения их углеводородоотдачи. Обзор исследований показывает, что к настоящему времени в мировой практике целенаправленно еще не осуществлялись проекты нагнетания неуглеводородных газов в газоконденсатные залежи с целью поддержания пластового давления или вторичного извлечения из них ретроградного конденсата. В отечественной и зарубежной литературе описаны только экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия газоконденсатных смесей с диоксидом углерода и азотом и особенностей вытеснения газоконденсатных систем из пористых сред этими газами. В числе работ, посвященных подробному анализу проблемы воздействия на газоконденсатные залежи неуглеводородными газами, следует, в первую очередь, отметить работы К.С. Басниева, А.И. Гриценко, Р.М. Маргулова, Р.И. Вяхирева, И.А. Леонтьева, М.А. Пешкина и Р.М. Тер-Саркисова.

Основными препятствиями к широкому использованию процессов закачки неуглеводородных газов при разработке газоконденсатных залежей являются: во-первых, значительное изменение параметров газоконденсатной системы при взаимодействии с нагнетаемыми неуглеводородными агентами, во-вторых – сложность разделения отбираемой продукции на пластовую углеводородную систему и нагнетаемые неуглеводородные газы после прорыва их к эксплуатационным скважинам.

Анализ существующих способов повышения конденсатоотдачи позволяет прийти к выводу о том, что сайклинг-процесс получил широкое распространение за рубежом (США и Канада) в силу сложившихся конъюнктурных факторов. Его весьма ограниченное применение в России связано с рядом недостатков данного метода воздействия, в частности – невозможностью длительной консервации газа по причинам экономического характера. Сайклинг-процесс может быть эффективным, если применять его с начала разработки газоконденсатного месторождения. На практике мы имеем разрабатываемые на естественном режиме истощенные газоконденсатные месторождения с выпавшим в пласте ретроградным кон-

денсатом. На данный момент не существует эффективных методов вторичной добычи ретроградного конденсата.

Вторая глава посвящена математическому моделированию физических экспериментов на насыпных моделях.

Ранее в филиале ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта были проведены физические эксперименты на стеклянных насыпных моделях для изучения закономерностей перераспределения в пласте выпавшего ретроградного конденсата.

Для математического моделирования сегрегационного разделения углеводородных фаз использовалась одномерная трехфазная гидродинамическая модель, реализованная на основе программного комплекса «Протей» с соответствующими дополнениями. При использовании указанной модели учитываются гравитационные и капиллярные силы.

Сущность математического моделирования физических процессов перераспределения выпавшего конденсата в элементе продуктивного пласта заключается в численном решении дифференциальных уравнений фильтрации трехфазной смеси в пористой среде с фазовыми переходами, которые имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial h} (\sum_{\alpha} \rho_{\alpha} l_{\alpha}^k \vec{v}_{\alpha}) + \frac{\partial}{\partial t} (m \sum_{\alpha} \rho_{\alpha} l_{\alpha}^k s_{\alpha}) + q^k = 0,$$

$$\alpha = \text{вода, конденсат, газ}; \quad k = \text{H}_2\text{O}, \text{C}_{5+}, \text{C}_{1-4},$$

где ρ_{α} – плотность фазы « α »; l_{α}^k – массовая доля компонента « k » в фазе « α »; \vec{v}_{α} – скорость фазы « α »; m – пористость; s_{α} – насыщенность фазой « α »; q^k – массовая плотность источника по компоненту « k ».

Уравнения дополняются замыкающими соотношениями, а также начальными и граничными условиями, что делает задачу корректной (т.е. имеющей, вообще говоря, единственное решение).

Замыкающие соотношения:

$$\sum_{\alpha} S_{\alpha} = 1, \quad \sum_k l_{\alpha}^k = 1 \quad \forall \alpha.$$

Начальные условия: при $t = 0$

$$p = p(h),$$

$$s_g = s_g(h),$$

$$s_c = s_c(h)$$

(в каждой точке пласта заданы начальные давление и насыщенности фазами).

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial h} \right|_{h=0} = \left. \frac{\partial p}{\partial h} \right|_{h=H} = 0 \quad - \text{условие непроницаемости соответственно верхней и}$$

нижней границ, где H – высота физической модели.

В качестве закона движения выбирается обобщенный закон Дарси:

$$\bar{v} = -\frac{kf_\alpha}{\mu_\alpha} \frac{\partial}{\partial h} (p_\alpha - \int \gamma_\alpha dh),$$

где k – абсолютная проницаемость; f_α – относительная проницаемость по фазе « α »; μ_α – динамическая вязкость фазы « α »; p_α – давление в фазе « α »; γ_α – удельный вес фазы « α ». Разница давлений в фазах контролируется функциями капиллярных давлений.

Относительные фазовые проницаемости (ОФП) в системе «конденсат-вода» зависят от водонасыщенности, в системе «конденсат-газ» – от газонасыщенности. Фазовая проницаемость по конденсату f_o комбинируется с использованием второй модели Стоуна, задаваемой формулами:

$$f_o = f_{ocw} \left[\left(\frac{f_{ow}}{f_{ocw}} + f_w \right) \left(\frac{f_{og}}{f_{ocw}} + f_g \right) - (f_w + f_g) \right],$$

$$f_{ocw} = f_{ow}(s_{wc}),$$

где f_{ow}, f_{og} – ОФП по конденсату, соответственно, в системах «конденсат-вода» и «конденсат-газ»; f_w – проницаемость по воде; f_g – проницаемость по газу, s_{wc} – остаточная водонасыщенность.

Решение системы уравнений неразрывности фаз, дополненной начальными и граничными условиями, позволяет найти распределения давления и насыщенностей фазами по длине модели в каждый момент времени. Для численного интегрирования использована полностью неявная разностная схема. На каждом шаге по времени разностные уравнения решались методом Ньютона. Для решения систем линейных уравнений на каждой ньютоновской итерации применен обобщенный метод сопряженных градиентов (процедура ORTHOMIN), превращающийся в данном случае в обычную матричную прогонку.

Исходными данными для расчета перераспределения насыщенности конденсатом на одномерной трехфазной гидродинамической модели являются:

- пористость и проницаемость;
- высота модели;
- начальное флюидонасыщение;

- физико-химические свойства флюидов;
- ОФП и капиллярные давления.

Высота модели принята в соответствии с проводимыми физическими экспериментами равной 1,5 м. Остальные характеристики сеточной модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение параметра
Пористость, доли ед.	0,1
Проницаемость, мкм ²	0,4
Водонасыщенность, доли ед.	0 – 0,2
Конденсатонасыщенность, доли ед.	0,13 – 0,2
Плотность конденсата, кг/м ³	702
Вязкость конденсата, мПа·с	1,36
Число узлов сеточной области	25

В данной серии экспериментов внешнее воздействие на моделируемую систему не предполагается (т.е. в данном случае третье слагаемое в уравнении фильтрации будет равно нулю).

В ходе численных экспериментов варьировались остаточная водонасыщенность, начальная конденсатонасыщенность и пороги подвижности относительных фазовых проницаемостей по конденсату в обеих системах.

Моделирование физических экспериментов показало, что при приведенных выше параметрах модели флюидальная система после четырех месяцев приходит практически в стационарное состояние.

Первая серия экспериментов проведена при различных величинах остаточной водонасыщенности, в результате чего установлено существенное влияние данного фактора на характер протекания процесса. Оценена динамика изменения конденсатонасыщенности при ее начальной величине 0,13 и порогах подвижности жидкой углеводородной фазы, равных 0,06. Сравнение результатов указывает на то, что наличие связанной воды интенсифицирует сегрегационные процессы. При начальной водонасыщенности, равной 0,05, результаты практически идентичны отсутствию воды.

Также были проведены эксперименты при более высокой начальной насыщенности конденсатом ($S_0 = 0,2$). Отличия заключаются в основном в толщине образовавшейся техногенной конденсатной оторочки.

Аналогичные эксперименты проведены при порогах подвижностей конденсата, равных 0,1. При отсутствии воды сегрегации жидкой углеводородной фазы практически не происходит.

Была проведена адаптация математической модели по данным физических экспериментов на насыпной модели. Адаптация выполнялась по наиболее представительным результатам физического моделирования. Поскольку коллекторские свойства заведомо известны, в ходе адаптации осуществлялась вариация функций относительных проницаемостей фаз и капиллярных давлений в системе «конденсат-газ» (вода считается неподвижной фазой). После многовариантных расчетов удалось добиться удовлетворительного совпадения распределений насыщенности конденсатом, полученных расчетным и экспериментальным путем. Сопоставление расчетных и фактических значений конденсатонасыщенности по участкам физической модели представлено на рис. 1.

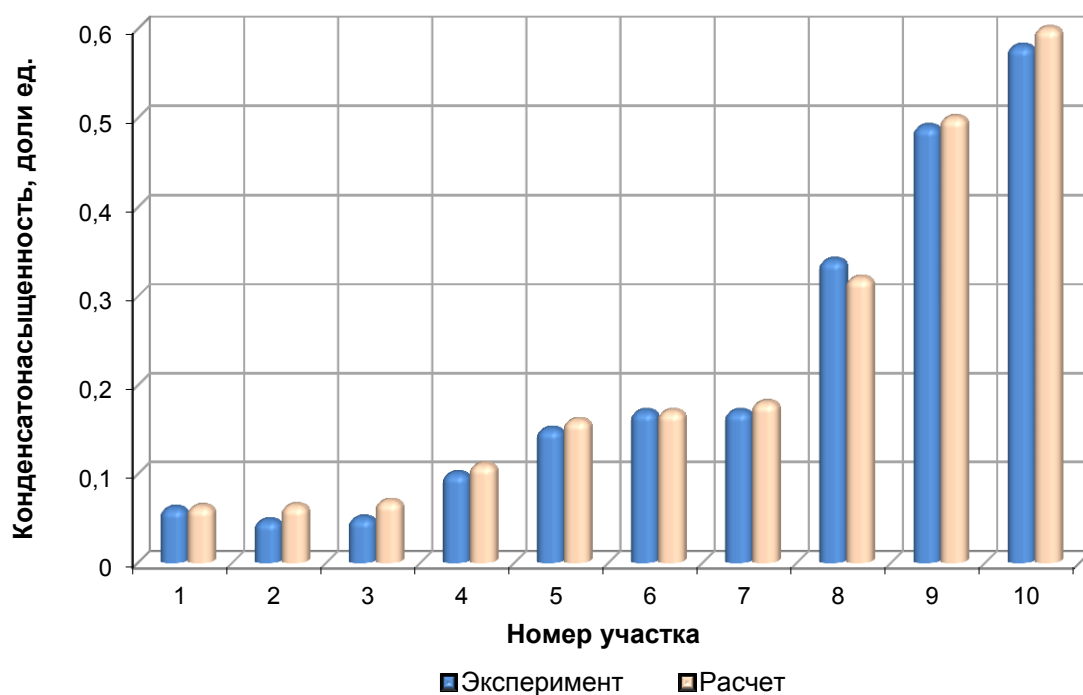


Рис. 1. Результаты адаптации модели

В результате проведенных исследований на фрагментарных математических моделях получены количественные характеристики сегрегационных процессов на насыпных моделях и установлено влияние различных факторов на их протекание.

Третья глава посвящена математическому моделированию физических экспериментов на керновых моделях. Приводятся результаты математических экспериментов с целью исследования сегрегационных процессов ретроградного конденсата при истощении физической модели.

Для математического моделирования сегрегационного разделения углеводородных фаз также использовалась одномерная трехфазная гидродинамическая модель. Численные эксперименты естественного истощения газоконденсатной залежи проводились на модели, описанной во второй главе.

Изначально предполагалось, что модель насыщена газоконденсатной смесью при давлении 36 МПа с начальным содержанием конденсата 363 г/м^3 . Плотности, вязкости фаз и массовые доли компонентов в фазах являются функциями давления, что дает возможность прогноза фазовых переходов, в частности, ретроградных процессов в режиме истощения. При увеличении давления плотность жидкой углеводородной фазы уменьшается в диапазоне от 710 до 400 кг/м^3 , вязкость жидкой фазы ведет себя аналогично: уменьшается с 1,4 до 0,26 $\text{мПа}\cdot\text{с}$. Данные зависимости, а также начальные условия приняты по аналогии с пластовой системой Вуктыльского нефтегазоконденсатного месторождения. Остаточная водонасыщенность составляет 0,2 доли ед. Пороги подвижности конденсата составляли 0,06 и 0,1 доли ед. Истощение модели осуществлялось заданием отбора газа из верхнего узла области интегрирования до достижения давления в модели 1,2 МПа.

Рассмотрено три варианта, когда требуемое количество газа отбиралось соответственно за 5, 15 и 60 сут. Результаты расчетов показывают, что чем быстрее истощается залежь, тем меньше толщина образовавшейся конденсатной оторочки. Сказанное объясняется сочетанием нескольких факторов, в первую очередь физико-химическими свойствами конденсата. При более высоких давлениях конденсат имеет более низкие плотность и вязкость, а низкий темп отбора предоставляет больше времени для стекания жидкой углеводородной фазы.

Данный фактор здесь является определяющим. Это подтверждает и тот факт, что конденсатонасыщенность в верхнем узле модели к окончанию процесса меньше для случая низкого темпа отбора. Высокий темп отбора приводит к тому, что часть конденсата не успевает стекать вниз и уносится в жидкой фазе, однако гравитационный фактор является преобладающим – конденсатоотдача по вариантам отличается на 1,6 и 0,6 %.

Таким образом, применительно к условиям лабораторных экспериментов установлено влияние темпа отбора газа из газоконденсатной залежи на характер гравитационного оседания жидкой углеводородной фазы в продуктивной толще.

В серии подвариантов численных экспериментов ОФП по конденсату в системах «конденсат-вода» и «конденсат-газ» принимались зависящими только от

насыщенностей фазами. Однако известно, что изменение давления оказывает влияние на величину поверхностного натяжения и, как следствие, на фазовую проницаемость. В этой связи в другой серии математических экспериментов ОФП в системах «конденсат-вода» и «конденсат-газ» считались зависящими не только от насыщенностей, но и от давления. Такой подход, соответственно, отразился на динамике сегрегационных процессов, которая представлена на рис. 2. Моделирование осуществлялось с низким темпом отбора газа из модели (в течение 60 сут), после чего еще столько же времени модель выдерживалась в состоянии покоя.

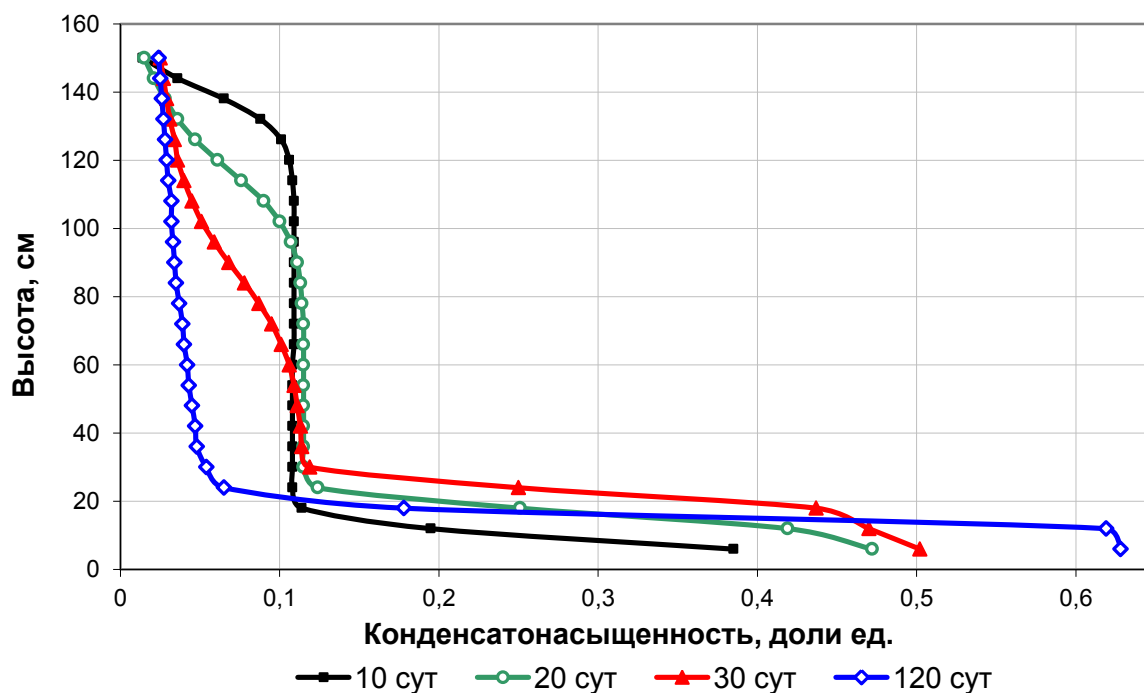


Рис. 2. Динамика сегрегационного процесса при ОФП, зависящих от насыщенности и давления

В результате проведенных исследований на фрагментарных математических моделях, с одной стороны, установлена возможность проявления сегрегационных процессов при истощении газоконденсатных залежей, которые могут приводить к образованию техногенной конденсатной оторочки вблизи газовой контакта. С другой стороны, выявлено, что существенное влияние на характер протекания сегрегационных процессов оказывает темп отбора газа, причем это влияние качественно одинаково при различных порогах подвижности конденсата. Таким образом, при проведении физических экспериментов на истощение рекомендуется отбирать газ низкими темпами. При этом отбор продукции необходимо производить с верхнего конца модели, чтобы исключить дополнительное извлечение сегрегированной жидкой фазы.

Четвертая глава посвящена моделированию образования техногенной конденсатной оторочки при истощении газоконденсатных залежей.

Проведены математические эксперименты на масштабных математических моделях с целью исследования сегрегационных процессов ретроградного конденсата при истощении газоконденсатных залежей массивного и пластового типа.

Для оценки возможности образования техногенных оторочек ретроградного конденсата использовалась трехмерная трехфазная гидродинамическая модель. Ее уравнения идентичны представленным во второй главе с поправкой на трехмерность течения.

Для моделирования образования техногенных конденсатных оторочек в истощенных газоконденсатных залежах использованы две модели, одна из которых соответствует участку залежи массивного типа (модель 1), другая – пластового (модель 2).

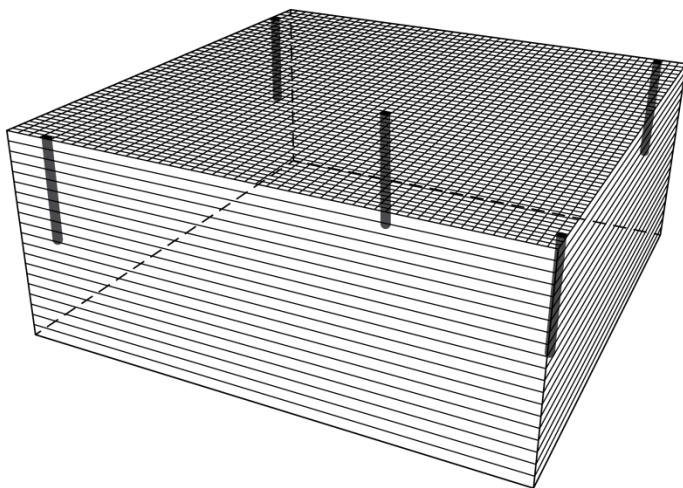


Рис. 3. Схема участка массивной залежи (модель 1)

Модель 1 (рис. 3), созданная для исследования механизма вертикальной сегрегации, представляет собой прямоугольный параллелепипед и характеризуется параметрами, представленными в табл. 2. Первоначально участок вскрыт пятью добывающими скважинами, у которых проперфорированы части, вскрывающие верхнюю половину продуктивной толщи.

Модель 2 (рис. 4), созданная для исследования механизма латеральной сегрегации, представляет собой участок наклонного пласта и характеризуется параметрами, представленными в табл. 3. Пласт характеризуется вертикальной неоднородностью и представляет собой переслаивание высоко- и низкопроницаемых пропластков, проницаемости которых относятся как 4:1. Участок вскрыт одной добывающей скважиной, расположенной в верхней части пласта.

Вертикальная сегрегация

В течение первых 35 лет залежь обрабатывается указанными выше скважинами в режиме истощения пластовой энергии. За данный период извлечено 47 млрд м³ сухого газа и 6,63 млн т стабильного конденсата (соответственно фракций C₁₋₄ и C₅₊). Коэффициенты извлечения составляют соответственно 0,83 и 0,325.

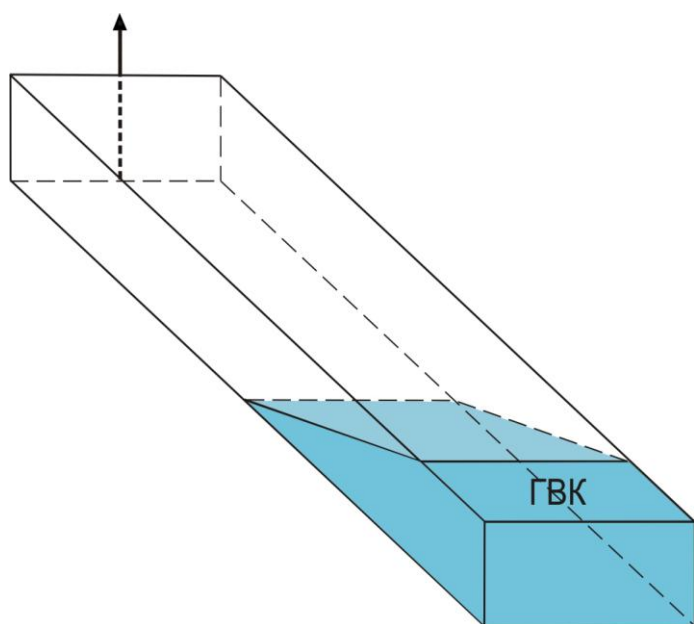


Рис. 4. Схема участка пластовой залежи (модель 2)

Давление в пласте вследствие высоких отборов распределяется неравномерно – депрессионные воронки достигают почти 2 МПа, в соответствии с этим распределяется конденсатонасыщенность. Процесс гравитационного разделения начинается достаточно быстро, уже через 10 лет после начала разработки распределение конденсатонасыщенности по вертикали заметно возрастает с глубиной (на 10-й год разработки в слое 10 конденсатонасыщенность распределяется равномерно и составляет при-

мерно 0,1). Следует отметить, что к концу расчетного периода насыщенность конденсатом несколько снижается, что связано с увеличением плотности последнего и, отчасти, проявлением процесса прямого испарения.

Структура техногенной конденсатной оторочки на конец 35-го года разработки следующая: толщина ее составляет 10 % от общей при средней насыщенности конденсатом 0,425; в 19 и 20-ом слоях к окончанию 35-го года разработки насыщенность конденсатом становится практически равномерной.

Таблица 2
Количественная характеристика модели 1

Параметр	Значение параметра
Размерность	51×51×20
Гипсометрия, м	от 2400 до 3830
Линейный размер ячейки, м	40
Пористость, доли ед.	0,10
Проницаемость коллектора, мкм ²	0,01
Начальное пластовое давление, МПа	33,2 – 37,0
Содержание конденсата, г/м ³	360
Запасы газа, млрд м ³	56,6
Запасы конденсата, млн т	20,4
Годовой отбор газа от запасов, %	5

Таблица 3

Количественная характеристика модели 2

Параметр	Значение параметра
Размерность	45×255×21
Гипсометрия, м	от 2750 до 3756
Линейный размер ячейки, м направление Oх направление Oу	20 38
Пористость, доли ед.	0,11
Проницаемость по латерали, мкм ²	0,3 – 1,2
Проницаемость по вертикали, мкм ²	10 ⁻⁵
Начальное пластовое давление, МПа	34,6 – 39,1
Содержание конденсата, г/м ³	360
Уровень ГВК, м	3518
Запасы газа, млрд м ³	4,28
Запасы конденсата, млн т	1,54
Годовой отбор газа от запасов, %	4,5

Латеральная сегрегация

В течение первых 35 лет залежь обрабатывается скважиной в сводовой части в режиме истощения пластовой энергии. За данный период извлечено 3,42 млрд м³ сухого газа и 502 тыс. т стабильного конденсата (соответственно фракций C₁₋₄ и C₅₊). Коэффициенты извлечения составляют соответственно 0,80 и 0,326.

Давление в залежи вследствие высокой проницаемости снижалось достаточно равномерно, и его распределение в большей степени детерминировалось геометрией залежи и гравитационными силами. Процесс гравитационного разделения фаз происходит с различной скоростью в пластах разной проницаемости, однако к концу расчетного периода во всех из них формируется техногенная конденсатная оторочка толщиной примерно 44 м (около 10 % от этажа газоности). Конденсатонасыщенность в среднем составляет 0,55 (несколько выше, чем в предыдущей серии экспериментов). Это можно объяснить влиянием некоторого количества внедрившейся в залежь воды из законтурной области за счет собственного упругого запаса.

В результате проведенных исследований на масштабных математических моделях залежей массивного и пластового типа подтверждена возможность про-

явления сегрегационных процессов при истощении газоконденсатных залежей с высокопроницаемыми коллекторами, которые могут приводить к образованию техногенной конденсатной оторочки вблизи газоводяного контакта. Установлено, что образование техногенной оторочки ретроградного конденсата возможно, как при вертикальной, так и при латеральной сегрегации.

В пятой главе приведены рекомендации по проектированию вторичной добычи конденсата в истощенных газоконденсатных залежах.

Согласно результатам экспериментов по оценке возможности образования техногенных оторочек ретроградного конденсата, проведенных в рамках четвертой главы, общая толщина оторочки для смеси с высоким содержанием конденсата в пластовом газе составила примерно 10 % от этажа газоносности при насыщенности конденсатом около 0,425 в случае вертикальной сегрегации и 0,55 – в случае латеральной сегрегации. Это предполагает возможность вторичной добычи конденсата.

После анализа возможных агентов воздействия было выбрано заводнение, которое в условиях поставленной задачи будет представлять естественное водогазовое воздействие.

Численные эксперименты по заводнению истощенных газоконденсатных залежей проведены на представленных в четвертой главе моделях массивной и пластовой залежей, на которых выполнены расчеты показателей разработки в режиме истощения с гравитационным разделением фаз. По аналогии условно назовем их вертикальным и латеральным заводнением.

Очевидно, что добычу ретроградного конденсата в силу относительно небольшой толщины техногенной оторочки целесообразно осуществлять системой горизонтальных скважин, пробуренных на данную оторочку. Расположение нагнетательных скважин в данном случае является предметом оптимизации.

Проведены численные эксперименты по заводнению непосредственно самой оторочки и нагнетанию воды в различные зоны газонасыщенной области.

Вертикальное заводнение

Горизонтальные скважины расположены в нижней части модели 1. Вертикальные нагнетательные скважины в плане расположены так же, как и добывающие. Расчеты проведены по четырем вариантам, рассмотренные варианты отличаются расположением интервалов перфорации. Объемы закачки таковы, что давление нагнетания не превышает гидростатического. Расчетный период определяется обводненностью продукции, которая должна достигнуть 98 %.

Вариант 1 – закачка воды производится в скважины, которые были добывающими, причем в течение пяти лет отбор конденсата не производится. Задержка добычи требуется для того, чтобы воздействие достигло конденсатной оторочки. В результате анализа процесса заводнения и извлечения ретроградного конденсата обращает на себя внимание тот факт, что относительная конденсатонасыщенность (в углеводородной смеси) растет, что связано с ростом давления и «разбуханием» конденсата вследствие растворения в нем легких фракций. Еще одна особенность – образование конденсатного целика, обусловленное гравитационными силами (жидкая углеводородная фаза всплывает).

К концу расчетного периода накопленное извлечение газа и конденсата составит соответственно 47,32 млрд м³ и 8,41 млн т, дополнительная добыча – 0,32 млрд м³ и 1,78 млн т, коэффициент извлечения газа (КИГ) – 0,836, коэффициент извлечения конденсата (КИК) – 0,412. Для реализации варианта требуется около 188 млн т воды. Из анализа динамики добычи конденсата видно, что время между началом закачки и добычи – также предмет оптимизации, однако очевидно, что в каждом конкретном случае должна решаться соответствующая задача на гидродинамической модели рассматриваемой залежи.

Вариант 2 – нагнетательные скважины вскрывают нижнюю часть залежи, в том числе и конденсатную оторочку (последние пять слоев). Добывающие скважины вводятся в эксплуатацию через год после начала закачки воды. Протекание процесса и его результаты существенно отличаются от соответствующих показателей предыдущего варианта. Значительное количество воды поступает в выше лежащие слои, подъем конденсата происходит более интенсивно.

После анализа динамики основных показателей разработки можно констатировать более низкую эффективность процесса по сравнению с вариантом 1. К концу расчетного периода накопленное извлечение газа и конденсата составит соответственно 47,15 млрд м³ и 7,54 млн т, дополнительная добыча – 0,15 млрд м³ и 0,91 млн т, КИГ и КИК – 0,833 и 0,370. Для реализации варианта требуется около 103 млн т воды.

Вариант 3 – нагнетание воды производится непосредственно над условным контактом газа и конденсатной оторочки, т.е. начиная с 18-го слоя и выше до 14-го. Анализ характера протекания процесса заводнения и извлечения конденсата говорит о том, что данная технология оказывается более эффективной, чем в варианте 2. К концу расчетного периода накопленное извлечение газа и конденсата составит соответственно 47,15 млрд м³ и 7,59 млн т, дополнительная добыча –

0,15 млрд м³ и 0,96 млн т, КИГ и КИК – 0,833 и 0,372. Для реализации варианта требуется около 123 млн т воды.

Вариант 4 – комбинация вариантов 1 и 3: интенсивное нагнетание воды производится в слои 1 – 10 и 14 – 18. Данная технология оказывается более эффективной, чем в варианте 3, но проигрывает варианту 1. К концу расчетного периода накопленное извлечение газа и конденсата составит соответственно 47,16 млрд м³ и 7,60 млн т, дополнительная добыча – 0,16 млрд м³ и 0,97 млн т, КИГ и КИК – 0,833 и 0,373. Для реализации варианта требуется около 193 млн т воды.

Сопоставление дополнительной добычи конденсата по вариантам представлено на рис. 5.

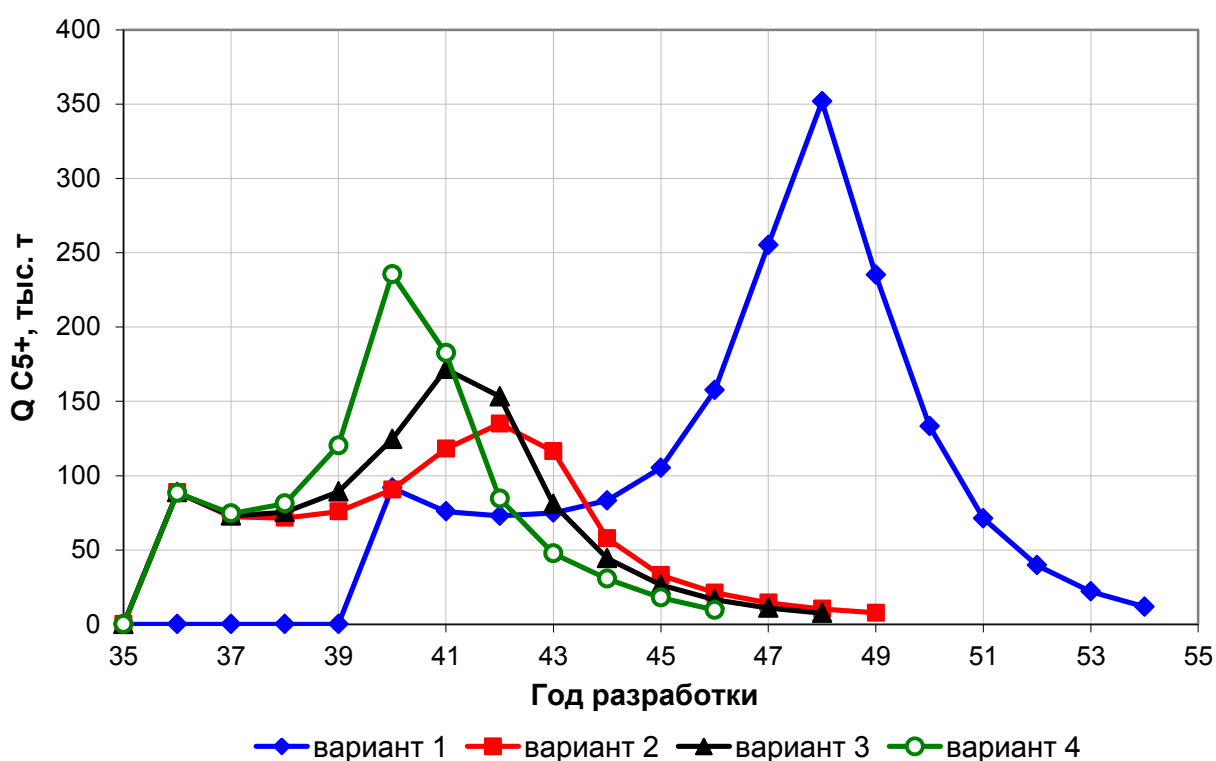


Рис. 5. Сопоставление дополнительной добычи конденсата по вариантам при вертикальном заводнении

Латеральное заводнение

Расчеты также проведены по четырем вариантам. Добыча конденсата осуществляется горизонтальными скважинами, вскрывающими всю наклонную толщину примерно посередине техногенной оторочки. Нагнетание воды производится через горизонтальные (за исключением четвертого варианта) скважины, различное расположение которых определяет варианты расчетов, которые выбраны с учетом результатов, полученных на вертикальной модели.

Вариант 1 – нагнетательная скважина расположена в центральной части газонасыщенной области. Закачка воды в первые два года производится без добычи конденсата, после чего две добывающие скважины вводятся в эксплуатацию. К концу расчетного периода накопленное извлечение газа и конденсата составит соответственно 3,484 млрд м³ и 0,719 млн т, дополнительная добыча – 0,064 млрд м³ и 0,217 млн т, КИГ и КИК – 0,814 и 0,467. Для реализации варианта требуется около 4,68 млн т воды.

Вариант 2 – нагнетательная скважина расположена ближе к техногенной оторочке. Закачка воды первый год производится без добычи конденсата, после чего две добывающие скважины вводятся в эксплуатацию. К концу расчетного периода накопленное извлечение газа и конденсата составит соответственно 3,452 млрд м³ и 0,704 млн т, дополнительная добыча – 0,032 млрд м³ и 0,202 млн т, КИГ и КИК – 0,806 и 0,457. Для реализации варианта требуется около 4,68 млн т воды.

Вариант 3 – нагнетательная скважина расположена ближе к скважине, осуществлявшей первоначальную добычу газа и конденсата. Первые четыре года закачка воды производится без добычи конденсата, после чего две добывающие скважины вводятся в эксплуатацию. К концу расчетного периода накопленное извлечение газа и конденсата составит соответственно 3,683 млрд м³ и 0,8 млн т, дополнительная добыча – 0,263 млрд м³ и 0,298 млн т, КИГ и КИК – 0,861 и 0,519. Для реализации варианта требуется около 6,84 млн т воды.

Вариант 4 – под нагнетание используется добывающая скважина в купольной части. Закачка воды без добычи конденсата происходит в течение первых шести лет. К концу расчетного периода накопленное извлечение газа и конденсата составит соответственно 3,868 млрд м³ и 0,836 млн т, дополнительная добыча – 0,448 млрд м³ и 0,334 млн т, КИГ и КИК – 0,904 и 0,543. Для реализации варианта требуется около 7,92 млн т воды.

Сопоставление дополнительной добычи конденсата по вариантам представлено на рис. 6.

Результаты расчетов и их сопоставительный анализ позволяют сделать вывод, что наибольший эффект с точки зрения конечной конденсатоотдачи как при вертикальном (массивная залежь), так и латеральном (пластовая) заводнении достигается при нагнетании воды в сводовую часть залежи. Эффект усиливается, если добыча конденсата начинается с некоторым сдвигом во времени (5–6 лет). Для массивной залежи прирост коэффициента извлечения конденсата составил

0,087, для пластовой – 0,218 абсолютных единиц. Лучшие технологические показатели по второй залежи обусловлены более высокой плотностью сетки скважин. Однако реализация такого подхода требует, с одной стороны, наибольшего количества воды для нагнетания в пласт, с другой – смещает по времени максимум добычи конденсата. Очевидно, что в каждом конкретном случае должна решаться оптимизационная задача.

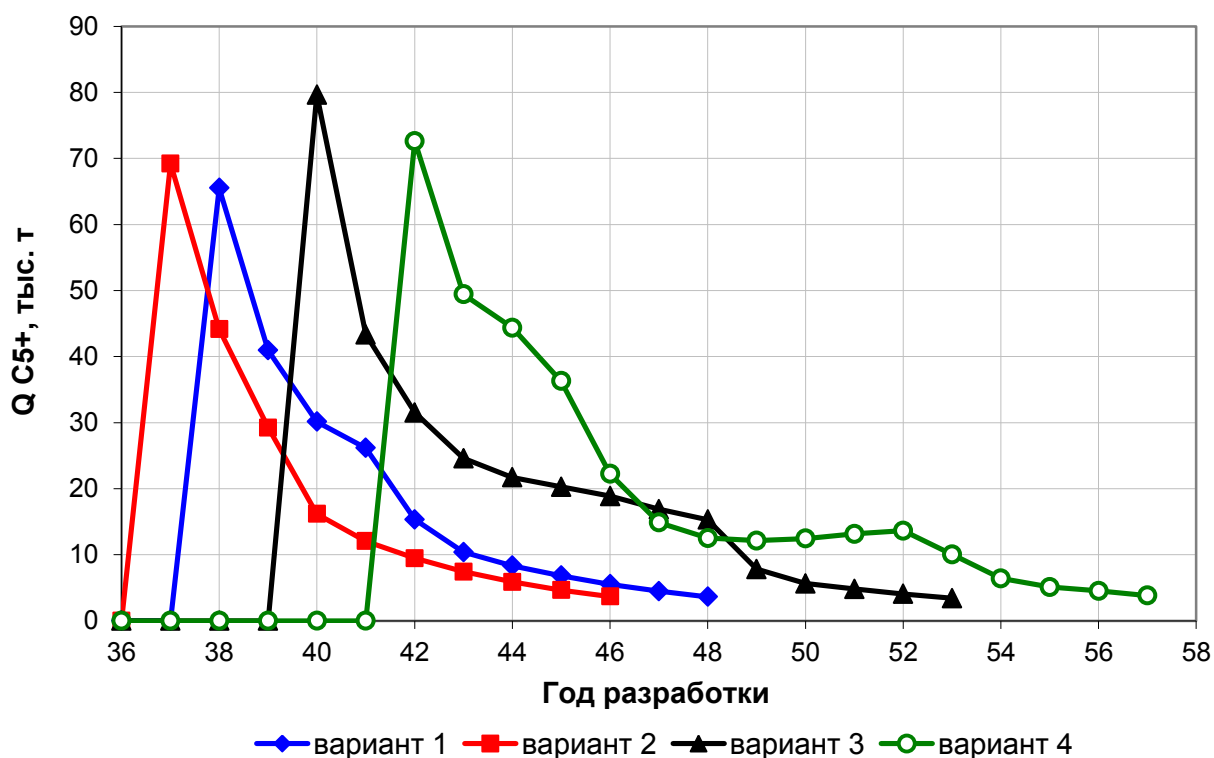


Рис. 6. Сопоставление дополнительной добычи конденсата по вариантам при латеральном заводнении

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Создана одномерная трехфазная гидродинамическая модель для математического моделирования физических экспериментов на насыпных моделях. Подтверждена возможность проявления сегрегационного разделения углеводородных фаз на насыпных моделях пласта, установленная на физической модели. Установлено существенное влияние остаточной водонасыщенности на характер протекания процесса: наличие связанной воды интенсифицирует сегрегационные процессы.

2. Проведена адаптация математической модели по данным физических экспериментов, которая показала, что гидродинамическая модель адекватно описывает физические процессы в насыпной модели.

3. Проведены численные эксперименты естественного истощения физической керновой модели. Установлена возможность проявления сегрегационных процессов при истощении газоконденсатных залежей. Выявлено, что существенное влияние на характер протекания сегрегационных процессов оказывает темп отбора газа из модели: чем быстрее истощается модель, тем меньше толщина образовавшейся конденсатной оторочки. Причем это влияние качественно одинаково при различных порогах подвижности конденсата.

4. Проведены численные эксперименты на масштабных математических моделях залежей массивного и пластового типа для изучения образования техногенных конденсатных оторочек вблизи газоводяного контакта под действием гравитационных сил. Установлено, что образование техногенной оторочки возможно как при вертикальной, так и латеральной сегрегации даже при значительном расстоянии от свода до газоводяного контакта. Также выявлено, что общая толщина оторочки для смеси с высоким содержанием конденсата в пластовом газе ($\sim 360 \text{ г/м}^3$) составляет примерно 10 % от этажа газоносности при значительной насыщенности конденсатом. Это предполагает возможность его вторичной добычи.

5. В результате расчетов установлено, что заводнение истощенных газоконденсатных залежей является достаточно эффективным способом разработки техногенных конденсатных оторочек. Также выявлено, что в каждом конкретном случае взаимное расположение добывающих и нагнетательных скважин является предметом оптимизации. Разработаны рекомендации по проектированию вторичной добычи ретроградного конденсата в истощенных газоконденсатных залежах.

**Основные результаты диссертационных исследований
опубликованы в следующих работах:**

Статьи в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией
Министерства образования и науки Российской Федерации:

1. Кашуба А.В., Назаров А.В. Моделирование физических экспериментов для изучения возможности образования техногенных конденсатных оторочек при истощении газоконденсатной залежи // Экспозиция Нефть Газ. – 2011. – №1. – С. 32–34.

2. Кашуба А.В., Назаров А.В. Предпосылки вторичной добычи конденсата из техногенных оторочек // Наука и техника в газовой промышленности. – 2011. – №2. – С. 56–61.

3. Кашуба А.В., Назаров А.В., Вокуев В.С. Физическое и математическое моделирование сегрегационных процессов на насыпных моделях // Газовая промышленность. – 2011. – №3. – С. 31–33.

4. Кашуба А.В., Назаров А.В. О возможности образования техногенных конденсатных оторочек в истощенных газоконденсатных залежах пластового типа // Технологии нефти и газа. – 2011. – №3. – С. 56–59.

5. Кашуба А.В., Назаров А.В. О возможности образования техногенных конденсатных оторочек в истощенных газоконденсатных залежах массивного типа // Нефтепромысловое дело. – 2011. – №4. – С. 9–13.

6. Кашуба А.В., Назаров А.В. Изучение особенностей образования техногенной конденсатной оторочки // Нефтяное хозяйство. – 2011. – №6. – С. 108–110.

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях:

7. Кашуба А.В., Назаров А.В. Алгоритм построения неструктурированных сеток для уточнения методики гидродинамического моделирования взаимодействия скважин // Эффективность освоения запасов углеводородов: науч.-техн. сб. В 4 ч. Ч. 2. Разработка и эксплуатация месторождений. Комплексные исследования нефтегазоконденсатных пластовых систем / Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта. – Ухта, 2010. – С. 169–173.

8. Кашуба А.В. Математическое моделирование сегрегационных процессов на насыпных моделях // Рассохинские чтения: материалы межрегионального семинара (3–4 февраля 2011 г., Ухта) / под редакцией Н.Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2011. – С. 224–228.

9. Кашуба А.В. Математическое моделирование сегрегационного разделения углеводородных фаз при истощении газоконденсатной залежи // XII международная молодежная научная конференция «Севергеозкотех – 2011»: материалы конференции (16–18 марта 2011 г., Ухта): в 5 ч. Ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2011. – С. 330–334.

10. Кашуба А.В. О возможности вторичной добычи конденсата // II научно-технический семинар «Актуальные вопросы проектирования разработки месторождений углеводородов»: материалы семинара (26 мая 2011 г., Москва) / ООО «Газпром ВНИИГАЗ». – Москва, 2011. – С. 7.

Соискатель

А.В. Кашуба

Подписано к печати 23.06.2011 г.
Заказ № 3483
Уч. изд. л. 1,5. Формат бумаги А5
Тираж 150 экз.

Отпечатано в филиале ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта
По адресу 169300, г. Ухта, ул. Севастопольская, 1а, тел. 75-16-85