

4. Постоянное полимерное заводнение формально имеет наибольший прирост в добыче нефти – 47,3 %. Однако, как уже отмечалось ранее, данная технология имеет более медленные темпы отбора в сравнении с технологией чередующейся закачки полимерного раствора и газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Муслимов Р.Х. *Современные методы управления разработкой нефтяных месторождений с применением заводнения: учеб. пособ.* – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2002. – 596 с.
2. Бриза Карел. *Обоснование технологии полимерного заводнения залежей высоковязких нефтей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Санкт-Петербургский гос. горный ин-т.* – 2010.

3. *Научно-техническое сопровождение разработки месторождения Северные Бузачи: договор № SC12/113/00/S: сводный отчет за 2012 г.* ЗАО "КОНКОРД". – М., 2013. – 209 с.

4. Сургучев М.Л. *Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов.* – М.: Недра, 1985. – 340 с.
5. *MORE 6.7 Technical Reference.* ROXAR, 2011. – 152 p.
6. *Исследование выработки запасов нефти из послойно неоднородного по проницаемости пласта с применением полимерного заводнения / И.В. Владимиров, М.Н. Шаймарданов, Е.В. Задорожный, С.И. Хазов, Р.А. Гнилицкий // Нефтепромысловое дело.* – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2012. – № 9. – С. 5–11.
7. Владимиров И.В., Пичугин О.Н., Абиляхиров Д.Т. *Влияние структурно-механических свойств нефти на эффективность изотермического и неизотермического нестационарного заводнения // Нефтепромысловое дело.* – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2013. – № 11. – С. 6–13.

УДК 622.276.1/4.001.57

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ В КОЛЛЕКТОРЕ С ВЫСОКОПРОНИЦАЕМЫМИ КАНАЛАМИ

И.В. Владимиров, О.Н. Пичугин
(ЗАО "КОНКОРД", г. Москва)

Влияние высокопроницаемых фильтрационных каналов (суперколлекторов) на процессы извлечения нефти недостаточно изучены в настоящее время. С одной стороны, высокая проницаемость канала обеспечивает высокие начальные дебиты и дает высокие темпы отбора подвижных запасов. С другой – быстрое обводнение, неравномерность выработки запасов нефти, отсечение части запасов от дренажа системой разработки [1].

Остаются открытыми и вопросы влияния высокопроводящих каналов на эффективность теплового воздействия. Ниже на основе гидродинамической модели неизотермической фильтрации исследуем влияние высокопроницаемого канала на эффективность разработки залежи при тепловом воздействии.

Исследование выработки запасов нефти из продуктивного пласта с учетом неизотермических процессов проведем на математической модели трехфазной фильтрации. В качестве инструмента исследований используем пакет гидродинамического моделирования "Tempest-More" (производитель Roxar/Smedvig) версии 6.7.1, в которой реализована возможность моделирования движения жидкости в условиях неизотермичности процессов [2].

Рассмотрим участок залежи размером $250 \times 250 \times 20$ м. В зависимости от варианта рассматриваемой задачи коллектор залежи может быть однородным или содержать высокопроницаемый канал. Во всех вариантах задачи пористость основного объема коллектора $m = 0,3$ доли ед., проницаемость $K = 1$ мкм². Начальная нефтенасыщенность коллектора $S_0 = 0,9$

доли ед. Начальные пластовые давление и температура $P_0 = 4$ МПа, $T_0 = 30$ °С.

Плотность и вязкость воды в пластовых условиях составили 1,04 г/см³ и 0,95 сП, соответственно. Плотность нефти в поверхностных условиях – 0,925 г/см³. В пластовых условиях вязкость нефти – 450 сП, газосодержание – 10 м³/м³. Давление насыщения нефти газом – 2,2 МПа.

Относительные фазовые проницаемости, используемые в модели, взяты из работы [3].

При изменении температуры пласта предусмотрены температурные зависимости вязкости нефти и воды (рис. 1).

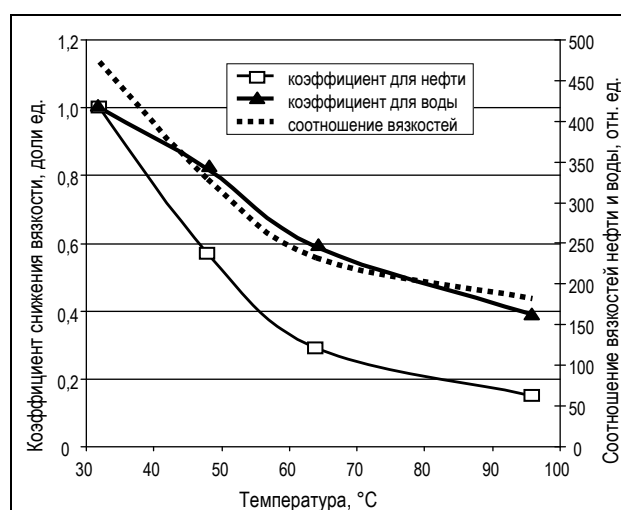


Рис. 1. Температурные зависимости вязкостей пластовой нефти и воды, соотношение вязкостей нефти и воды

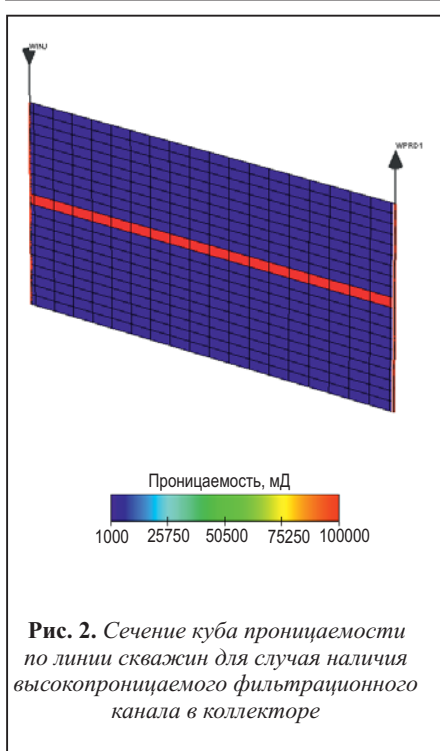


Рис. 2. Сечение куба проницаемости по линии скважин для случая наличия высокопроницаемого фильтрационного канала в коллекторе

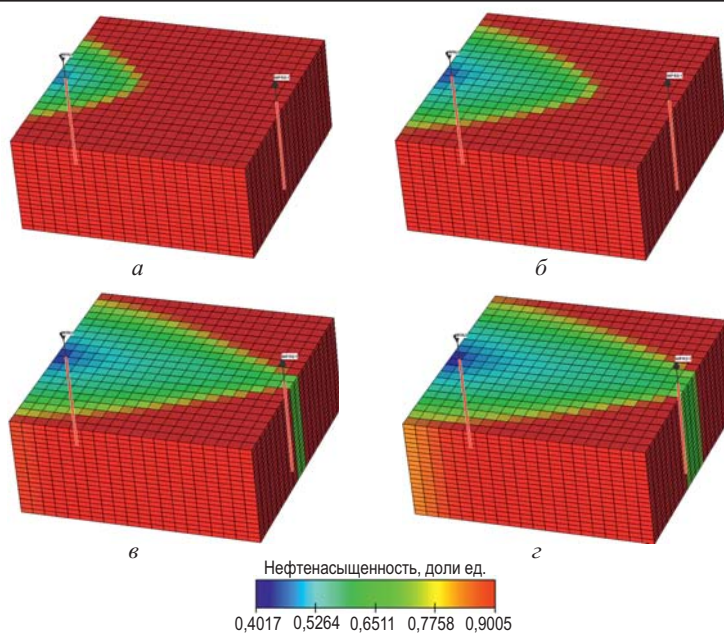


Рис. 3. Динамика кубов нефтенасыщенности для варианта 1 задачи. Кубы получены к концу: а – 2-го; б – 5-го; в – 8-го; г – 10-го годов

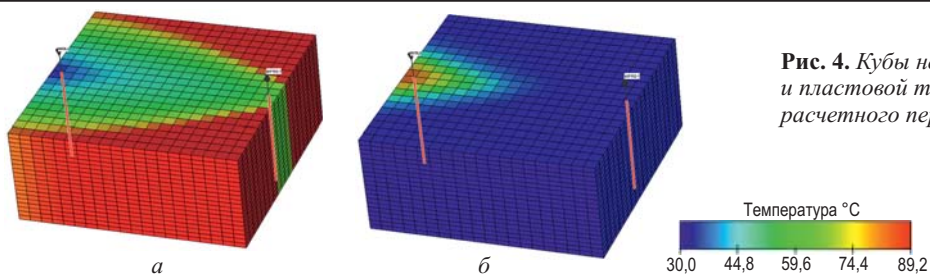


Рис. 4. Кубы нефтенасыщенности (а) и пластовой температуры (б) на конец расчетного периода для варианта 2 задачи

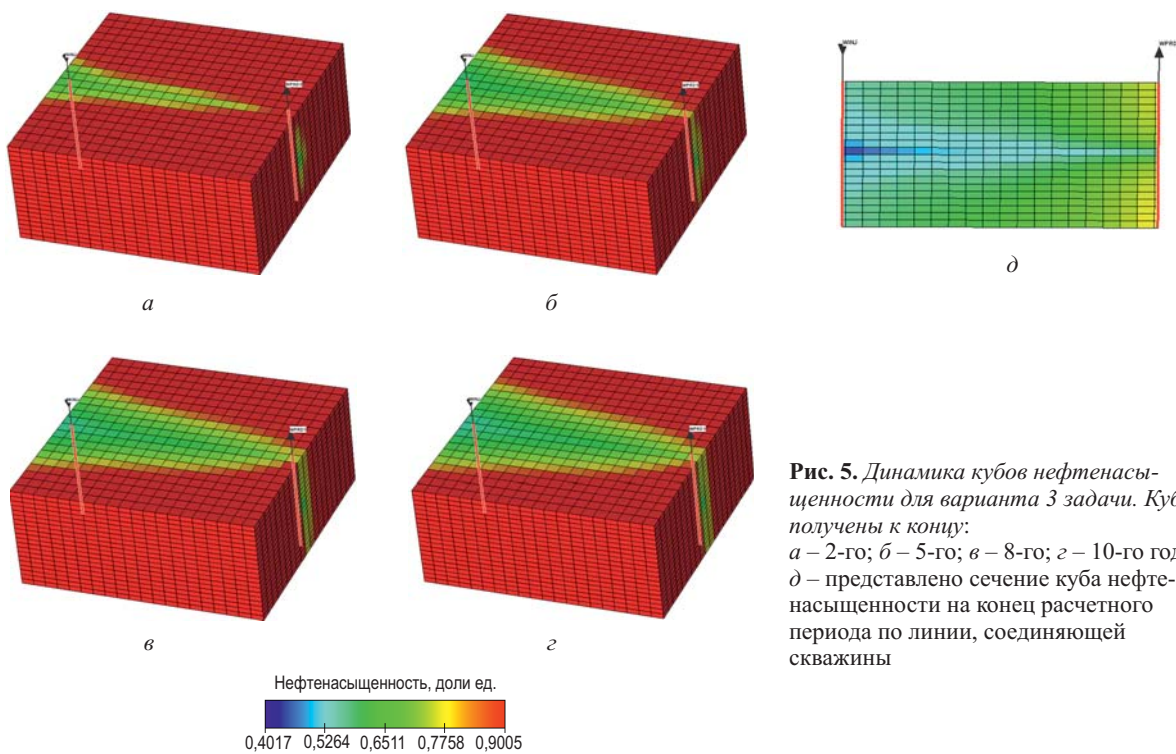


Рис. 5. Динамика кубов нефтенасыщенности для варианта 3 задачи. Кубы получены к концу: а – 2-го; б – 5-го; в – 8-го; г – 10-го годов; д – представлено сечение куба нефтенасыщенности на конец расчетного периода по линии, соединяющей скважины

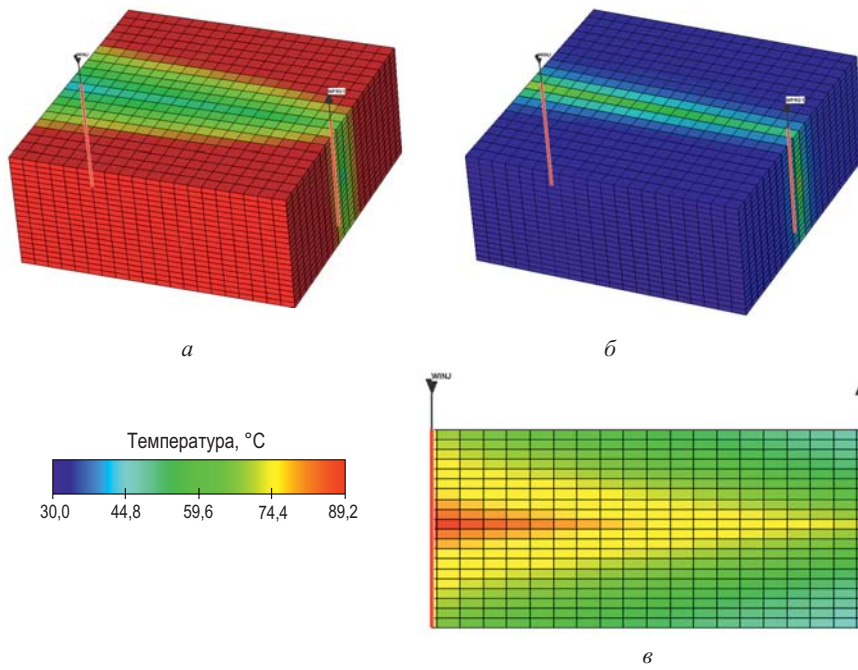


Рис. 6. Кубы нефтенасыщенности (а) и пластовой температуры (б) на конец расчетного периода для варианта 4 задачи; представлено сечение куба пластовой температуры (в) на конец расчетного периода по линии, соединяющей скважины

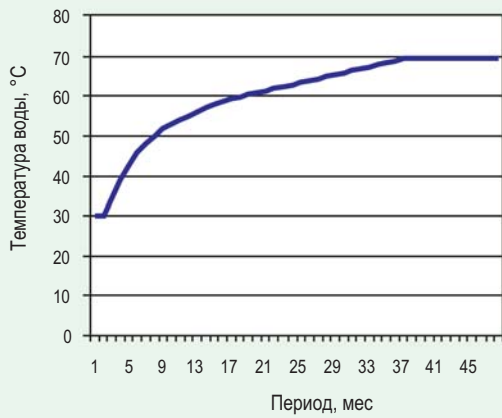


Рис. 7. Динамика температуры воды, поступающей в добывающую скважину (вариант 4)

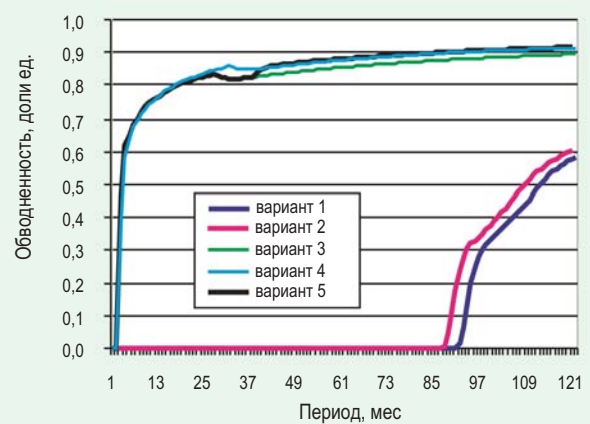
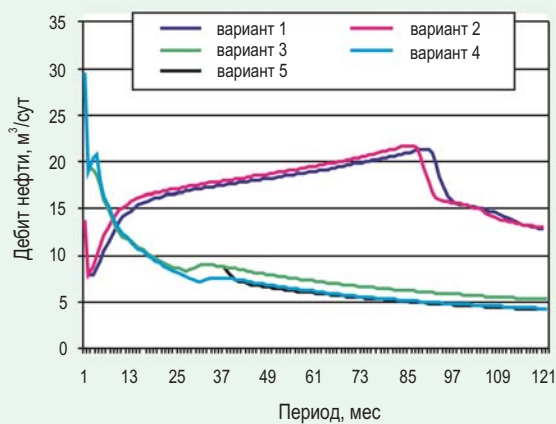


Рис. 8. Динамика технологических показателей по вариантам задачи: а – дебит нефти; б – обводненность

На участке залежи работают 2 скважины: добывающая и нагнетательная. Зададим ограничивающие условия на работу скважин. Для добывающей – нижний предел забойного давления не ниже 1 МПа, для нагнетательной – верхний предел забойного давления не выше 10 МПа. Во всех вариантах задач период расчетов устанавливается в 10 лет.

Рассмотрим несколько вариантов задачи:

вариант 1 (базовый) – коллектор однородный, изотермическое заводнение;

вариант 2 – коллектор однородный, неизотермическое заводнение с температурой воды 90 °С;

вариант 3 – коллектор содержит высокопроницаемый канал, проницаемость которого превышает проницаемость основного объема коллектора в 100 раз. Канал соединяет нагнетательную и добывающую скважины (рис. 2). Изотермическое заводнение;

вариант 4 – условия варианта 3, неизотермическое заводнение;

вариант 5 – условия варианта 3, первые 3 года изотермическое заводнение, затем до конца расчетного периода – неизотермическое заводнение.

При моделировании неизотермического заводнения использовалась модель Vinsome-Westerveld потери тепла через кровлю и подошву коллектора [2].

На рис. 3 представлена динамика куба нефтенасыщенности для варианта 1 задачи. Хорошо видно, что из-за высокой разницы в вязкостях вытесняемой и вытесняющей жидкостей фронт вытеснения вытянут в сторону добывающей скважины. Данные результаты согласуются с общепринятыми представлениями. В случае теплового воздействия (вариант 2) динамика поля нефтенасыщенности практически совпадает с динамикой поля нефтенасыщенности для варианта 1 (рис. 4). Это объясняется тем, что область изменения пластовой температуры сосредоточена в заводненной зоне пласта, т. е. фронт нагрева существенно отстает от фронта заводнения.

Рассмотрим теперь варианты задачи с высокопроницаемым фильтрационным каналом.

Вариант 3 предусматривает изотермическое заводнение. Наличие высокопроницаемого канала приводит к дополнительному увеличению неоднородности фронта вытеснения (рис. 5). При этом закачиваемая вода в первую очередь вытесняет нефть из высокопроницаемого канала, что приводит к росту обводненности продукции добывающей скважины, а затем за счет капиллярной пропитки вытесняет нефть из областей коллектора, расположенных выше (прикровельная часть) и ниже (приподошвенная часть) высокопроницаемого канала.

При неизотермическом заводнении (вариант 4) динамика куба нефтенасыщенности практически совпадает с вариантом 3. Небольшие отличия заключаются в несколько большем заводненном объеме в области отборов и в более узкой заводненной зоне в области нагнетания (рис. 6).

Более характерно изменение поля пластовой температуры. На рис. 6, б хорошо видно, что об-

ласть прогретого коллектора распространилась на всё межскважинное пространство. При этом по разрезу тепловое поле коллектора неоднородно и отражает проницаемостную неоднородность пласта (см. рис. 6, в).

Ввиду высокой проницаемости фильтрационного канала теплая вода начинает поступать в добывающую скважину спустя несколько месяцев после начала теплового воздействия. На рис. 7 представлена динамика температуры воды, поступающей в добывающую скважину из высокопроницаемого канала. Хорошо видно, что температура воды в добывающей скважине растет до установления термодинамического равновесия.

Таким образом, при наличии высокопроводящего канала тепловое воздействие распространяется в межскважинную зону, но по объему ограничено областью коллектора, прилегающей к данному фильтрационному каналу.

Вариант 5 является промежуточным между вариантами 3 и 4, и его рассмотрение обусловлено тем, что он наиболее близок к практическим условиям применения теплового воздействия.

Сравним динамику технологических показателей разработки рассмотренных вариантов задачи. На рис. 8 представлены динамики дебитов нефти и обводненности.

Как видно из рис. 8, наличие высокопроводящего канала существенно влияет на динамику технологических показателей. Для однородного коллектора первоначальное снижение дебита нефти связано с быстрым снижением пластового давления в области отбора. По мере возрастания пластового давления в результате закачки воды дебит нефти растет и достигает своего максимального значения к моменту прорыва воды (вариант 1). Тепловое заводнение (вариант 2) за счет более подвижного вытесняющего агента (горячей воды) позволяет быстрее поднять пластовое давление в области отборов, что обеспечивает большие дебиты нефти и в то же время быстрый прорыв воды к забою добывающей скважины. После прорыва воды дебиты для изотермического и неизотермического вариантов практически совпадают.

Для коллектора с высокопроницаемым каналом характерны высокие начальные дебиты нефти, которые в результате быстрого заводнения высокопроницаемой зоны резко снижаются. Обводненность добываемой продукции при этом быстро нарастает. Затем наблюдается кратковременная стабилизация дебита нефти, связанная с капиллярной пропиткой области, граничащей с высокопроницаемым каналом в области отборов. Далее происходит плавное снижение дебита нефти и более медленное нарастание обводненности. Небольшое увеличение дебита нефти связано с поступлением вытесняемой нефти по главным линиям тока, геометрически близким к высокопроницаемому каналу. Описанная динамика технологических показателей характерна для всех вариантов с высокопроницаемым каналом. остано-

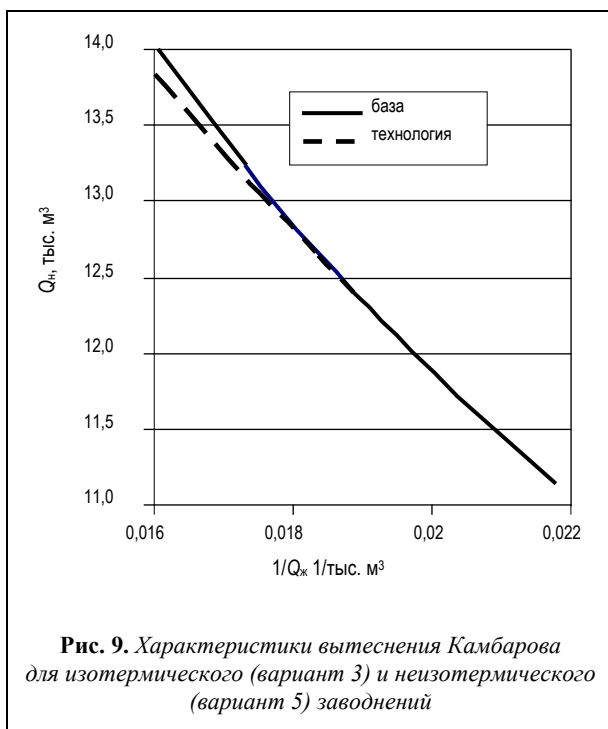


Рис. 9. Характеристики вытеснения Камбарова для изотермического (вариант 3) и неизотермического (вариант 5) заводнений

вмесь теперь на отличиях. Для неизотермического воздействия (вариант 4) в период стабилизации дебита нефти (по варианту 3) наблюдается кратковременный рост дебита, что связано как с прогревом части нефти в призабойной зоне добывающей скважины, так и с более быстрым повышением давления в области отборов. Однако по мере заводнения высокопроницаемого канала и повышения температуры воды в области отбора доля водной фазы в призабойной зоне добывающей скважины увеличивается (так как снижается ее вязкость), что приводит к большему снижению дебита нефти (чем в варианте 3) и увеличению обводненности. К этому приводит также и неравномерность прогрева коллектора по разрезу в зоне отбора – в заводненной области высокопроницаемого канала температура наибольшая, а в области сосредоточения остаточной нефти – минимальная. Причем разница эта составляет 15...20 °С.

Посмотрим теперь, как изменятся технологические показатели при переходе от изотермического заводнения к неизотермическому (вариант 5). На рис. 8 видно, что начало заводнения горячей водой сопровождается падением дебита нефти и ростом обводненности (!!!). Причины происходящего описаны выше. На рис. 9 представлена характеристика вытеснения Камбарова для варианта 5. Применение технологии теплового воздействия на коллектор с высокопроницаемым каналом сопровождается снижением эффективности вытеснения нефти. Таким образом, модельные расчеты показывают, что в коллекторах с высокопроницаемыми каналами применение теплового воздействия может привести к снижению эффективности нефтеизвлечения.

В заключение представим значения КИН на конец расчетного периода по рассмотренным вариан-

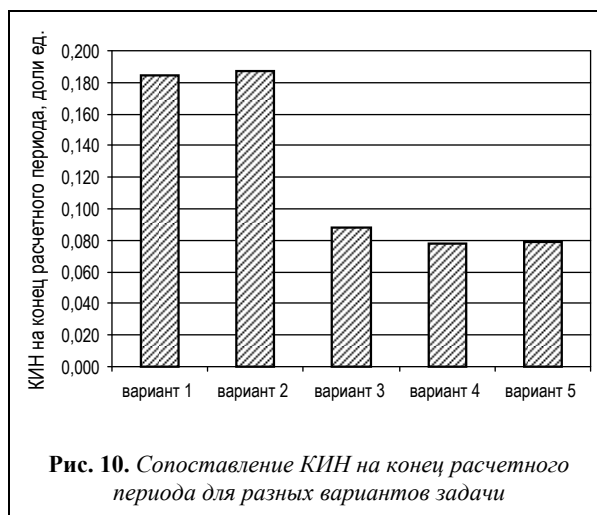


Рис. 10. Сопоставление КИН на конец расчетного периода для разных вариантов задачи

там задачи (рис. 10). Хорошо видно, что тепловое воздействие приносит небольшой эффект только для однородного коллектора. Для коллектора с высокопроницаемым каналом, соединяющим добывающую и нагнетательную скважины, тепловое воздействие снижает КИН на конец расчетного периода. Вывод достаточно неожиданный. Однако не затрагивались большие периоды расчетов (более 10 лет).

Выводы. Численное моделирование процессов неизотермической фильтрации в коллекторе, содержащем высокопроницаемый канал, показало следующее:

1. В однородном коллекторе, насыщенном высоковязкой нефтью, применение теплового воздействия незначительно увеличивает КИН на конец расчетного периода. Это связано с тем, что при заводнении ввиду значительной разницы в вязкостях нефти и воды образуется достаточно узкая полоса заводненного коллектора. При тепловом воздействии вытеснение также происходит в рамках тех же объемов коллектора, что и при изотермическом заводнении. Так как фронт нагревания отстает от фронта вытеснения, то тепловое воздействие осуществляется в основном на промытые зоны с небольшими объемами нефти. Поэтому эффект от теплового воздействия невелик.

2. Наличие в коллекторе высокопроницаемого канала, соединяющего нагнетательную и добывающую скважины, приводит к большему сужению фронта вытеснения, хотя и обеспечивает в начальный момент разработки высокие дебиты нефти. Быстрое заводнение высокопроницаемого канала приводит к резкому падению дебита нефти и росту обводненности. Применение теплового воздействия приводит к тому, что по мере заводнения высокопроницаемого канала и повышения температуры воды в области отбора доля водной фазы в призабойной зоне добывающей скважины увеличивается (так как снижается ее вязкость), что приводит к большему снижению дебита нефти (чем для изотермического заводнения) и увеличению обводненности. К этому приводит также и неравномерность прогрева

коллектора по разрезу в зоне отбора – в заводненной области высокопроницаемого канала температура наибольшая, а в области сосредоточения остаточной нефти – минимальная. Причем разница эта составляет 15...20 °С.

3. Построение характеристик вытеснения для процесса выработки запасов нефти из коллектора с высокопроницаемым каналом показало, что применение технологии теплового воздействия на коллектор с высокопроницаемым каналом сопровождается снижением эффективности вытеснения нефти.

УДК 622.276.1/4.038

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАБОТКИ ЗАПАСОВ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ ИЗ ПОСЛОЙНО НЕОДНОРОДНОГО ПО ПРОНИЦАЕМОСТИ КОЛЛЕКТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ И ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

И.В. Владимиров, О.Н. Пичугин
(ЗАО "КОНКОРД", г. Москва)

Среди широкого спектра технологий, применяемых для повышения эффективности нефтеизвлечения в разработке залежей высоковязкой нефти, трудно выделить универсальную технологию, которая давала бы устойчивые положительные результаты в течение продолжительного периода. Поэтому актуальным является поиск оптимальных для каждого этапа разработки технологий ПНП на основе гидродинамических расчетов.

Представленные ниже результаты являются логическим продолжением работ [1–4], а также дополняют и расширяют исследования, выполненные в статьях [5, 6].

Ранее рассмотрен ряд задач по определению эффективности разных технологий в условиях коллектора типа "двойная проницаемость". Было изучено влияние на выработку запасов нефти технологий полимерного заводнения и водогазового воздействия [5], теплового воздействия [6]. Общей особенностью рассмотренных задач является наличие развитой сети высокопроницаемых каналов (трещин). Ниже исследуем влияние технологий теплового воздействия и полимерного заводнения, а также их комбинаций на эффективность нефтевытеснения из неоднородного по проницаемости пористого коллектора.

Рассмотрим задачу о вытеснении нефти, обладающей высокой вязкостью, из коллектора, содержащего высоко- и низкопроницаемые слои.

Хорошо известно, что полноту извлечения нефти из пласта определяет его проницаемостная неоднородность. На практике для сильно неоднородных по проницаемости коллекторов достигаются более низкие значения КИН, чем при разработке достаточно однородных по проницаемости коллекторов. Общепринятым фактом считается первоочередная выработка высокопроницаемых слоев (пластов), в то время как заводнение низкопроницаемых объемов коллектора и вытеснение нефти из них происходят в

1. *Справочное руководство по проектированию и эксплуатации нефтяных месторождений (проектирование разработки) / под ред. Ш.К. Гиматудинова. – М.: Недра, 1983. – 463 с.*

2. *MORE 6.7 Technical Reference. ROXAR, 2011. – 152 p.*

3. *Владимиров И.В., Пичугин О.Н., Абишхаиров Д.Т. Влияние структурно-механических свойств нефти на эффективность изотермического и неизотермического нестационарного заводнения // Нефтепромысловое дело. – М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2013. – № 11. – С. 6–13.*

меньшей степени. Для повышения выработки запасов нефти низкопроницаемых слоев применяют технологии ПНП.

Ниже рассмотрим особенности применения различных технологий при извлечении высоковязкой нефти из послойно неоднородного по проницаемости коллектора. Для этого рассмотрим фильтрационную модель участка залежи с коллектором, состоящим из слоев с разной проницаемостью, разрабатываемого с применением заводнения. Исследование проведем на математической модели трехфазной фильтрации. В качестве инструмента исследований используем пакет гидродинамического моделирования "Tempest-More" версии 6.7.1 [7].

Математическая модель. Рассмотрим участок залежи размером 600 × 600 × 20 м (рис. 1). Коллектор залежи состоит из слоев с разной пористостью и проницаемостью. Предположим, что слои достаточно однородны по латерали. В области скв. WPRD1, WPRD2, WPRD3 слои разделены непроницаемыми разделами, в области скв. WPRD4 слои сливаются в единый пласт. Проницаемости слоев изменяются от 100 до 3000 мД, пористость – от 10 до 32 %. Начальная нефтенасыщенность коллектора $S_0 = 0,9$ доли ед. Начальные пластовые давление и температура: $P_0 = 4$ МПа, $T_0 = 30$ °С.

Свойства пластовых флюидов и ОФП, используемые в настоящей статье, приведены в работе [8].

Начальный объем геологических запасов нефти составляет 1263,3 тыс. м³.

На участке залежи работают 5 скважин: 4 добывающие и 1 нагнетательная. Для разных вариантов задачи устанавливается предельный период расчетов. При моделировании предполагалось, что нагнетательная и добывающие скважины пускаются в работу одновременно.

Для вариантов задачи с полимерным заводнением и тепловым воздействием использовались данные работ [5, 6].