

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ППАЗМЫ

Анатолий Викторович СТЕПАНОВ¹
Ирина Александровна ЗУБАРЕВА²
Евгений Рафаилович ВОЛГИН³

УДК 622.276

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЫТЕСНЕНИЮ НЕФТИ ТЕРМОПОЛИМЕРНЫМ РАСТВОРОМ

¹ кандидат физико-математических наук,
эксперт, Тюменский нефтяной научный центр
avstepanov5@rosneft.ru

² студент кафедры прикладной и технической физики,
Физико-технический институт,
Тюменский государственный университет;
специалист, Тюменский нефтяной научный центр
iazubareva-tnk@rosneft.ru

³ главный специалист, Нефтяная компания «Роснефть» (г. Москва)
ervolgin@rosneft.ru

Аннотация

Для применения результатов лабораторных потоковых экспериментов в секторных или полномасштабных гидродинамических моделях залежей используется моделирование экспериментов на микромасштабе, требующее настройки ряда параметров

Цитирование: Степанов А. В. Гидродинамическое моделирование лабораторных экспериментов по вытеснению нефти термополимерным раствором / А. В. Степанов, И. А. Зубарева, Е. Р. Волгин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 2 (30). С. 77-100. DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-77-100

численной модели составной сборки образцов керна. Настройка параметров численной модели керна производится при воспроизведении измеренных показателей потоковых экспериментов. При этом возникают неопределенности фильтрационно-емкостных свойств, связанные с неоднородностью образцов керна и неустойчивостью фронта вытеснения нагретым полимерным раствором. В настоящей работе разработан и реализован итерационный алгоритм, предусматривающий адаптацию серии синтетических гидродинамических моделей лабораторных экспериментов. В начале процесса адаптации учитывается весь спектр неопределенностей серии лабораторных экспериментов. На итерациях производится минимизация количества варьируемых параметров и погрешности адаптации моделей. Для повышения достоверности адаптации спектр 1D-моделей дополняется синтетическими 3D-моделями со стохастическим распределением неоднородности по пористости и проницаемости. Это позволяет в рамках моделирования более полно учитывать процессы фильтрации в условиях адсорбции полимера и неоднородности свойств коллектора, а также уточнять адаптируемые параметры с учетом ремасштабирования на расчетных сетках различной детальности. Разработанный алгоритм апробирован на экспериментах по вытеснению нефти нагретым полимерным раствором и определению относительной фазовой проницаемости в зависимости от температуры. Результатом применения стало снижение неопределенности варьируемых параметров: относительных фазовых проницаемостей в зависимости от концентрации полимерного раствора, фактора остаточного сопротивления, зависимости вязкости полимерного раствора от скорости сдвига. Данные результаты впоследствии передаются в процесс адаптации секторных и полномасштабных гидродинамических моделей.

Ключевые слова

Методы увеличения нефтеотдачи, термополимерный раствор, итерационный подход, гидродинамическое моделирование, оптимизация, лабораторные эксперименты, систематизация.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-77-100

Введение

В условиях увеличения доли трудноизвлекаемых запасов актуальным становится применение методов увеличения нефтеотдачи (МУН). Одним из примеров месторождений с трудноизвлекаемыми запасами (ТРИЗ) являются залежи высоковязкой нефти с применением заводнения, когда существенная разница в подвижности нефти и агента вытеснения создает риски его прорыва в добывающие скважины. Известным способом улучшения условий вытеснения является применение в качестве агентов закачки полимерных растворов, которые способствуют выравниванию фронта вытеснения путем уменьшения разницы подвижностей и изменения охвата заводнением. Поэтому внимания требует изучение и сравнение процессов фильтрации с закачкой воды и раствора полимера. Одним из таких способов являются лабораторные эксперименты.

Проведение потоковых лабораторных экспериментов позволяет изучать характерные особенности фильтрационных процессов в условиях минимального влияния факторов неопределенности, свойственной природным коллекторам. При этом полученные результаты относятся к конкретным образцам керна, в общем случае не характеризующих объект разработки в целом. Эффективным способом повышения качества разработки месторождений является гидродинамическое моделирование серии лабораторных экспериментов, по результатам которого могут быть получены уточняющие адаптированные параметры и зависимости. Использование такого подхода позволяет одновременно учитывать данные других лабораторных экспериментов по вытеснению, определению относительных фазовых проницаемостей (ОФП) и др. Именно такому комплексному процессу посвящен материал настоящей статьи.

Практика моделирования лабораторных экспериментов сводится к созданию упрощенных синтетических одномерных моделей, свойства которых могут быть заданы в простом случае в виде средних значений параметров. Адаптация таких моделей принципиально не отличается от сложившихся методических приемов. Так как эксперименты могут проводиться над серией образцов, имеющих различие по фильтрационно-емкостным свойствам (ФЕС), можно предположить, что при моделировании получится объективнее отражать особенности физических процессов, если адаптация будет учитывать особенности всего набора экспериментальных данных в комплексе. Такой системный подход к адаптации результатов исследований дает снижение общей неопределенности при применении их во время гидродинамического моделирования месторождения. Во всей совокупности экспериментов используется один вытесняющий агент — раствор полимера, поэтому при адаптации необходимо обращать внимание на аналогичный учет его свойств во всех моделях системы. В данной статье не акцентируется внимание на свойствах полимера, т. к. применяемый подход не рассматривается в качестве анализа и уточнения свойств полимера. Как звено в методологической цепочке, гидродинамическое моделирование лабораторных экспериментов позволяет дополнительно уточнить параметры адаптации физических процессов для дальнейшего их использования на секторных/полномасштабных моделях. Материал, изложенный в работе, не является альтернативным способом получения зависимостей и характеристик изучаемых образцов керна, но может рассматриваться как комплексный способ адаптировать полученные результаты лабораторных экспериментов для использования в гидродинамических моделях.

В данной работе реализован подход, основанный на итерационном оптимизационном принципе, когда минимизируется функционал погрешности адаптации и числа адаптационных параметров для всей совокупности моделей лабораторных экспериментов. Результаты в дальнейшем будут использоваться для создания секторных и полномасштабных гидродинамических моделей. Блок-схема моделирования показана на рис. 1.

Работа выполнена в два этапа. Первый — итерационная адаптация 1D-моделей экспериментов. Второй — итерационная адаптация численной 3D-модели

эксперимента со стохастическим распределением фильтрационно-емкостных параметров. Причиной перехода к трехмерному моделированию является невозможность воспроизведения изменений движения флюида, возникающих вследствие снижения проницаемости в результате адсорбции полимера породой коллектора. Минимизация числа варьируемых параметров позволяет уменьшить число степеней свободы в процессе адаптации моделей.

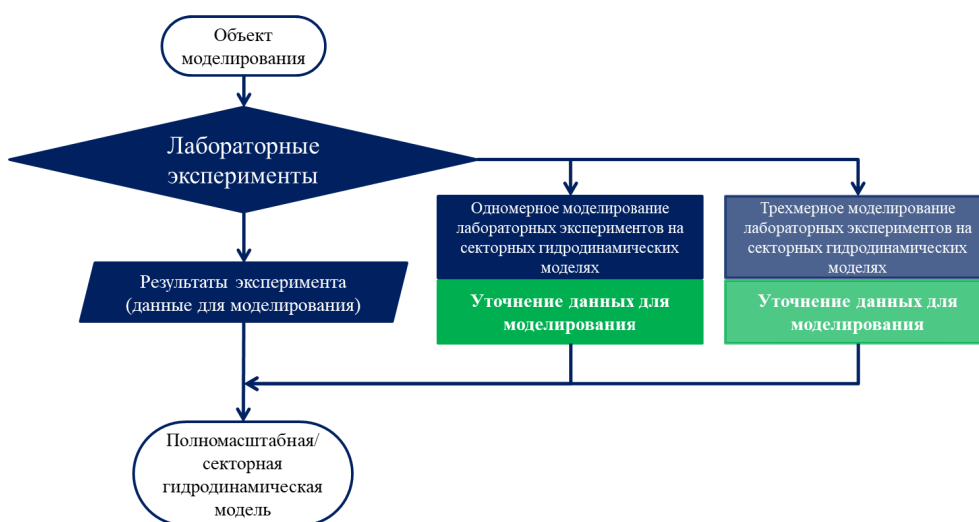


Рис. 1. Блок-схема адаптации гидродинамических моделей

Fig. 1. Block diagram of hydrodynamic models adaptation

Исходными данными для моделирования являлись: средние значения коэффициентов пористости и проницаемости для исследуемых образцов, коэффициенты нефте- и водонасыщенности, конечные точки и значения в конечных точках для кривых относительной фазовой проницаемости. Экспериментальные зависимости получены на основе проведенных лабораторных исследований в корпоративном центре исследования ядра ООО «ТННЦ». Исполнители экспериментов предоставили результаты для построения зависимости адсорбции полимера от концентрации при различных температурах, а также для адаптации моделей по фактическим значениям градиента давления и нефтенасыщенности. Все используемые переменные описаны в таблице 1.

Описание лабораторных экспериментов

Эксперименты, в частности по определению коэффициента вытеснения и определения ОФП [4, 9], были направлены на изучение процесса фильтрации многокомпонентной, многофазной системы «нефть — полимерный раствор — вода» с учетом влияния температуры в процессе вытеснения [5, 8]. В статье акцент сделан на моделирование экспериментов по вытеснению, но в процессе адаптации использовались данные с экспериментов по определению ОФП.

Таблица 1

Переменные

Table 1

Variables

Величина	Обозначение	Единицы измерения
Концентрация полимера в мольных долях	C	моль
Концентрация полимера в ppm	C_{ppm}	ppm
Молярная масса воды	μ_w	г/моль
Молярная масса полимера	μ_p	г/моль
Скорость сдвига	$\dot{\gamma}$	1/сек
Коэффициент степенной зависимости вязкости от скорости сдвига	γ_{fac}	б. р.
Линейная скорость фильтрации	u_l	м/с
Относительная проницаемость	k_r	д. ед.
Коэффициент пористости	φ	д. ед.
Насыщенность фазы	S_l	д. ед.
Множитель для изменения проницаемости за счет фактора остаточного сопротивления	R_{ka}	б. р.
Фактор остаточного сопротивления среды при адсорбции	ξ_R	б. р.
Текущая адсорбция	Ad_{cell}	кг/100 г породы
Максимальная адсорбция	Ad_{max}	кг/100 г породы
Изменная проницаемость	k^*	мкм ²
Начальная проницаемость	k_0	мкм ²

Всего было создано шесть одномерных синтетических моделей: два эксперимента по довытеснению нефти полимерным раствором, два эксперимента по стационарной фильтрации (ОФП), один длительный исследовательский тест на вытеснение и один эксперимент по определению динамической адсорбции. На рис. 2 показана схема, отражающая формальное представление обобщения результатов лабораторных экспериментов с учетом их многообразия. При моделировании использовался гидродинамический симулятор CMG STARS.

Основными осложняющими моделирование факторами были:

- неньютоновские свойства флюида;
- изменение температуры в ходе закачки;
- изменение концентрации полимерного раствора на разных этапах закачки;
- изменение расхода (скорости фильтрации);
- узкий диапазон двухфазной фильтрации.

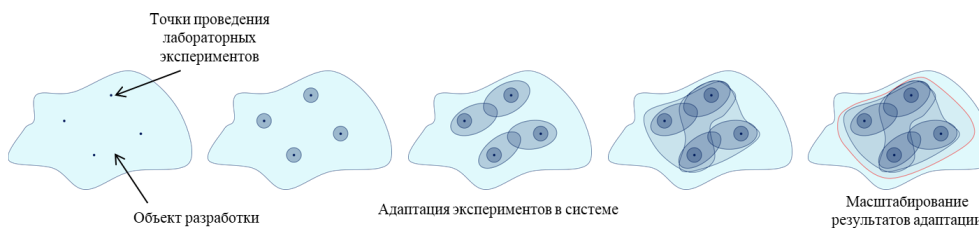


Рис. 2. Учет многообразия лабораторных данных при моделировании экспериментов в системе с дальнейшим масштабированием

Fig. 2. Consider the diversity of laboratory data when experiments' modeling in a system with further scaling

Подход к адаптации и одномерная модель

Дискретная модель представляет собой составной образец в форме параллелепипеда, размер сетки $500 \times 1 \times 1$ ячеек (рис. 3). Данная геометрия и дискретизация выбрана с учетом анализа сходимости численного решения и необходимости дальнейшей экстраполяции в 3D — с увеличением количества ячеек результаты расчета слабо меняются (рис. 4). Поровый объем образца равен поровому объему исследуемого керна, произведен пересчет объема с учетом изменения формы, установлено равенство площадей сечения объектов. На концах модели реализованы граничные условия — источник и сток равного расхода.

Учитывая процессы, возникающие при фильтрации полимерного раствора, постановка 1D-моделей не позволяет реализовать изменение линий тока в пространстве за счет редукации проницаемости по мере адсорбции полимера на стенках породы. Поэтому второй частью подхода является создание дополнительных 3D-версий синтетических моделей и их адаптация в общем итерационном процессе. Пространственное распределение параметров ФЕС получено на основе вероятностного распределения с сохранением средних значений и дисперсий.

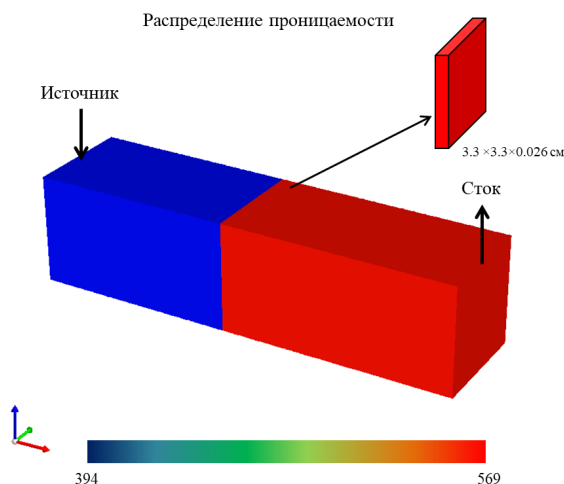


Рис. 3. Одномерная модель

Fig. 3. One-dimensional model

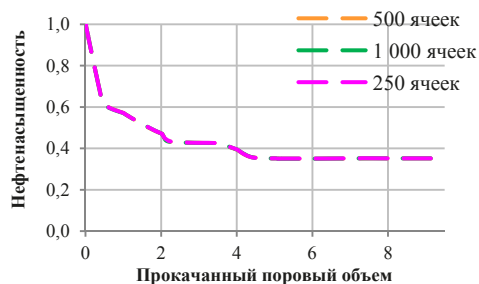


Рис. 4. Проверка сходимости

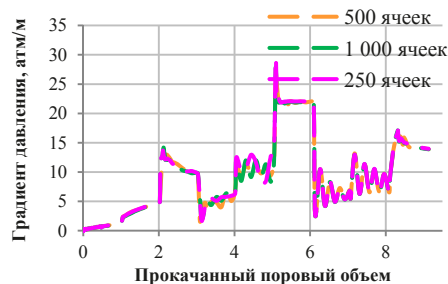


Fig. 4. Convergence checking

Таблица 2

Размеры моделей для анализа сходимости решения

1D-модель	N_x
1	250
2	500
3	1 000

Table 2

Model sizes for solution convergence analysis

В таблице 2 указаны размеры моделей, используемых для анализа сходимости.

Концепция адаптации моделей для воспроизведения данных экспериментов представляет собой итерационный процесс анализа чувствительности и совместной модификации моделей с минимизацией варьируемых параметров и идентичностью входных данных. Такой подход обеспечивает возможность сформировать обобщающий набор исходных зависимостей и адаптационных параметров, позволяющий воспроизвести совокупность динамических процессов как единую картину (рис. 5).

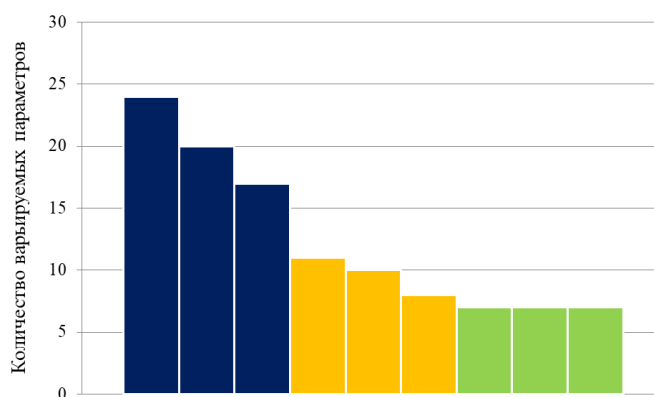


Рис. 5. Единовременная настройка всех моделей (итерации)

Fig. 5. One-time configuration of all models (iterations)

Расчетная логика адаптации моделей лабораторных экспериментов была единой и включала в себя следующие этапы работы с основными варьируемыми параметрами:

- задание начальных значений конечных точек для кривых ОФП по информации лабораторных экспериментов с последующей модификацией с учетом концентрации полимерного раствора;
- подбор формы кривых ОФП;
- модификация параметров адсорбции и фактора остаточного сопротивления;
- подбор коэффициента настройки степенной зависимости вязкости полимерного раствора от скорости сдвига.

В процессе итерационной адаптации минимизируется число варьируемых параметров путем фиксации их значений во всех адаптируемых моделях при достижении приемлемой степени настройки для всех моделей одновременно.

Длительный исследовательский тест

В ходе работы были построены модели для нескольких экспериментов, одним из самых иллюстративных являлся длительный исследовательский тест на вытеснение нефти полимерным раствором, в процессе которого в три этапа происходило изменение концентрации и температуры агента закачки, расхода жидкости.

Как известно, в случае вязких нефтей использование воды в качестве вытесняющего агента низкоэффективно. Вязкостная неустойчивость сказывается на снижении коэффициента охвата при вытеснении нефти водой на макроуровне, а также имеет место, видимо, низкая вытесняющая способность маловязкого агента более вязкой нефти на микроуровне [1]. Поэтому в эксперименте использовался раствор полимера с концентрацией 700 и 1 500 ppm. Прокачка осуществлялась при трех различных расходах (скоростях фильтрации), соответствующих фильтрации вблизи скважин, на некотором расстоянии и в удаленной части пласта. В процессе эксперимента закачивался полимерный раствор при двух различных температурах.

Важным инструментом адаптации моделей служит форма кривых ОФП. При настройке применялись корреляции Corey и LET в различных комбинациях как способ задавать качественно различную динамику фильтрации. Наборы кривых из разных корреляций применены во всех моделях потоковых экспериментов. Для стадий закачки агента (воды или полимерного раствора) применялись одинаковые наборы с разными значениями остаточной нефтенасыщенности. Комбинации зависимостей применены также потому, что вытеснение в одномерных моделях соответствует «поршневому» — происходит быстрая смена соотношения фаз от ячейки к ячейке (рис. 6).

Применение модифицированных кривых ОФП на одномерных осредненных моделях — таких, где пористость и проницаемость заданы средним значением, — эффективно при моделировании неизотермической фильтрации [6].

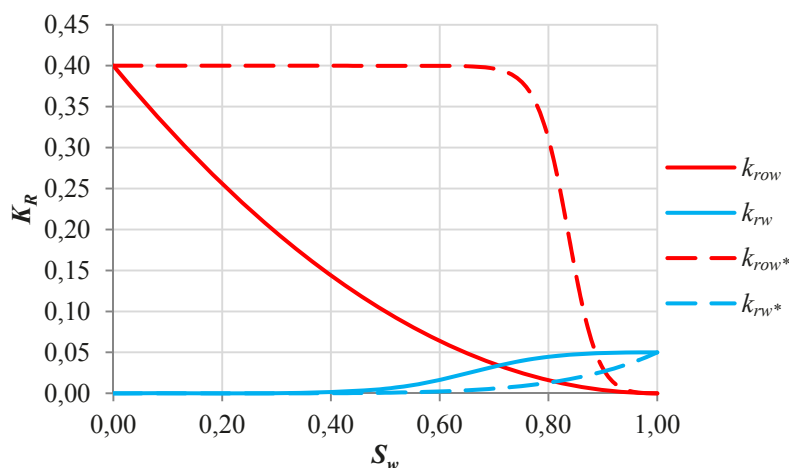


Рис. 6. Варианты формы кривых ОФП (нормировка в диапазоне от точки критической водонасыщенности до точки остаточной нефтенасыщенности)

Fig. 6. Variants of OFP curves' forms (normalization from critical water saturation to residual saturation)

В ходе моделирования использовалось несколько вариантов наборов фазовых — для разных этапов закачки, с изменением концентрации полимера. Симулятор позволяет производить интерполяцию заданных таблиц ОФП в зависимости от концентрации полимера. Этим достигается возможность динамического изменения насыщенности и подвижности в зависимости от концентрации в каждой расчетной ячейке модели. Величина δ (рис. 7) определяет прирост добычи.

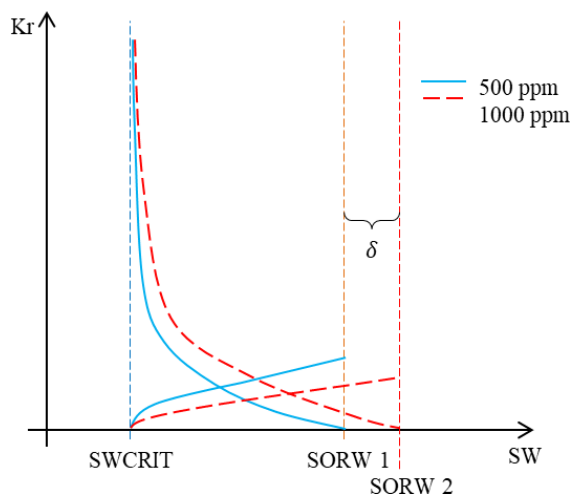


Рис. 7. Интерполяция фазовых для разных концентраций полимера

Fig. 7. Interpolation of OFP for different polymer's concentrations

Скорость сдвига существенно влияет на значение вязкости полимерного раствора и характер изменения давления. Реализованная в моделях нелинейность свойств позволила получить реалистичный результат, соответствующий экспериментальным значениям. Зависимость скорости сдвига от линейной скорости выглядит следующим образом:

$$\dot{\gamma} = \frac{\gamma_{fac} \cdot u_l}{f(k_r, \varphi, S_l)}$$

В результате адсорбции происходит изменение проницаемости системы, что приводит к росту перепада давления; величина этого перепада регулировалась за счет фактора остаточного сопротивления. Множитель для изменения проницаемости за счет фактора остаточного сопротивления [9]:

$$R_{k\alpha} = 1 + (\xi_R - 1) \cdot \frac{Ad_{cell}}{Ad_{max}}$$

Изменение проницаемости с учетом фактора остаточного сопротивления:

$$k^* = \frac{k_0}{R_{k\alpha}}$$

В процессе проведения итераций подобрано значение фактора остаточного сопротивления среды, который обеспечивает изменение градиента давления при смене режима закачки, но существенно не влияет на вытеснение в одномерной модели.

Для вычисления мольной доли концентрации использовалась формула:

$$C_{\text{моль}}^{\text{моль}} = \frac{C_{\text{ppm}}}{10^6} \cdot \frac{\mu_w}{\mu_p}$$

Трехмерная модель и ее настройка

Особенности реализации механизмов вытеснения полимерным раствором в гидродинамическом симуляторе, а также сложность адаптации градиента давления в 1D-моделях привели к созданию 3D-версий моделей. Процессы ремасштабирования эффектов моделирования полимерного заводнения рассматриваются во многих работах, в частности о сравнении однородных и неоднородных моделей [10]. В нашем случае это позволяет создать пространственный фронт вытеснения: с одной стороны, уменьшить фактор «поршневого» характера вытеснения, с другой — использовать возможность реализации вязкостной неустойчивости, что дополнительно повышает качество моделей. Для длительного исследовательского теста дополнительно создано несколько трехмерных моделей с учетом неоднородности по пористости и проницаемости, которая задавалась с помощью программы, написанной на языке Python. На выходе программа выдает набор значений, соответствующий нормальному

распределению с заданной дисперсией и фиксированным средним значением, соответствующим одномерной модели. Все средние параметры в трехмерных моделях были идентичны аналогичным параметрам при одномерном моделировании. Модели отличались дисперсией параметров пористости и проницаемости, а также некоторыми адаптационными параметрами. Статистическая характеристика порового пространства может быть учтена в процессе построения таких 3D-моделей [3].

За основу для построения принята одномерная модель для этого же эксперимента. Создано три модели, с различной детализацией: тип А — с крупными ячейками, тип Б — со средними ячейками и тип В — с мелкими ячейками. Всего в модели типа А насчитывается 500 ячеек, геометрия — параллелепипед $20 \times 5 \times 5$. Модель типа Б содержит 13 500 ячеек, типа В — 108 000 ячеек. Форма параллелепипеда сохраняется, размеры ячеек: $60 \times 15 \times 15$ — для типа Б и $120 \times 30 \times 30$ — для типа В. Размеры образцов одинаковые для всех моделей (рис. 8).

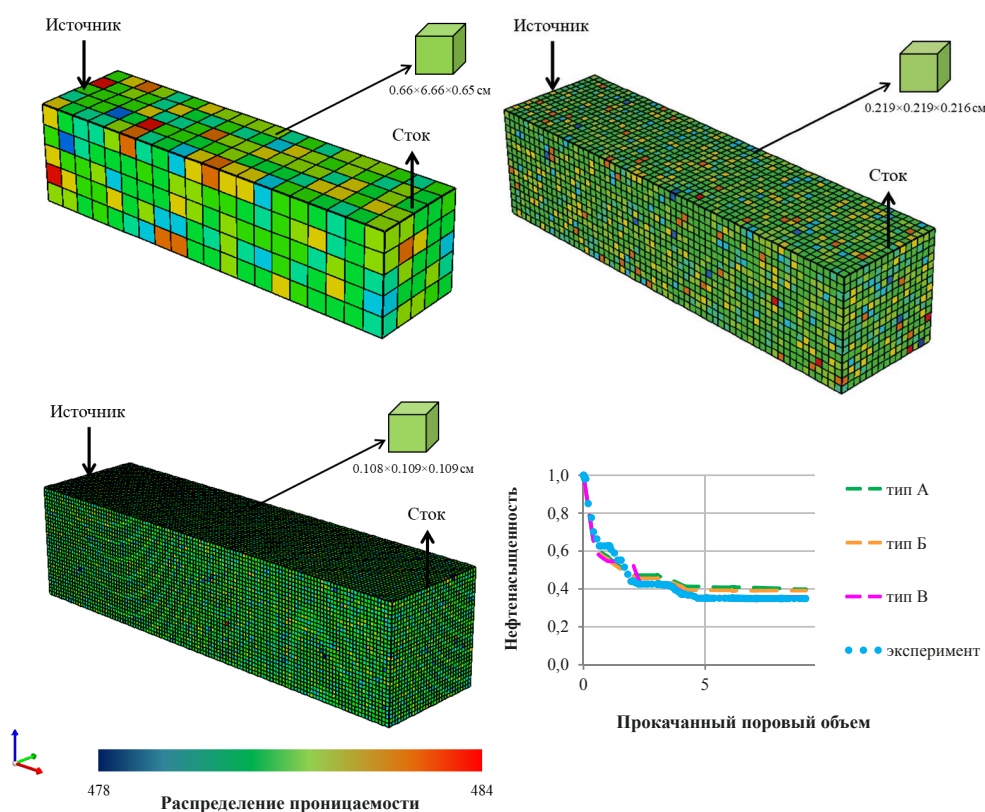


Рис. 8. Модель типа А (слева сверху), модель типа Б (справа сверху) и модель типа В (снизу); проверка сходимости

Fig. 8. A-model (left-up), B-model (right-up), C-model (down) and convergence checking

При трехмерном моделировании аналогично учитывалась проблема сходимости. Достаточная сходимость достигается в модели с 108 000 ячеек. Дробление модели на ячейки меньше, чем $120 \times 30 \times 30$, не целесообразно.

Также рассматривалась зависимость результата расчета от величины дисперсии случайного распределения параметров (таблица 3).

Накопленная вероятность распределения проницаемости при значениях дисперсии 0,1 и 1, в сравнении со средним значением 1D-модели, показана на рис. 9.

Таблица 3

Варианты дисперсии по моделям

Table 3

Model dispersion options

№	Модель	Параметр	Дисперсия	Максимум	Минимум	Среднее значение
1	$20 \times 5 \times 5$	Пористость	1	0,341	0,282	0,317
		Проницаемость		485,5	478,1	481,5
2	$20 \times 5 \times 5$	Пористость	0,1	0,3176	0,3169	0,317
		Проницаемость		481,8	481,2	481,5
3	$20 \times 5 \times 5$	Пористость	50	0,467	0,153	0,314
		Проницаемость		608,1	342,1	480,4
4	$60 \times 15 \times 15$	Пористость	1	0,321	0,314	0,317
		Проницаемость		485,1	477,5	481,5
5	$60 \times 15 \times 15$	Пористость	50	0,541	0,124	0,318
		Проницаемость		659,5	291,2	481,9
6	$120 \times 30 \times 30$	Пористость	1	0,321	0,312	0,317
		Проницаемость		486,5	477,2	481,5

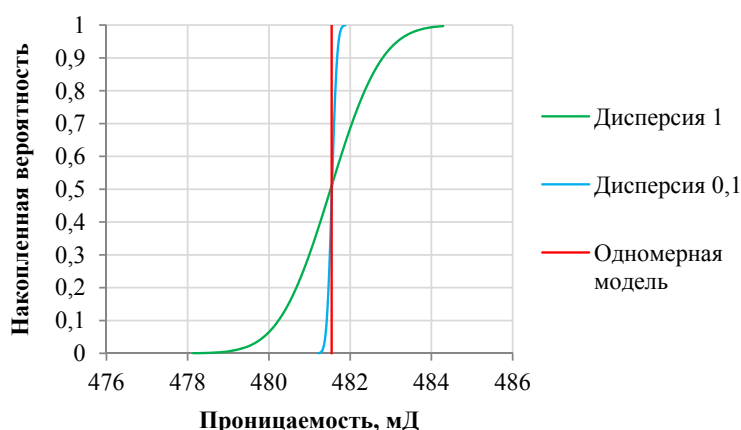


Рис. 9. Накопленная вероятность распределения проницаемости в зависимости от дисперсии

Fig. 9. Accumulated probability of permeability distribution versus variance

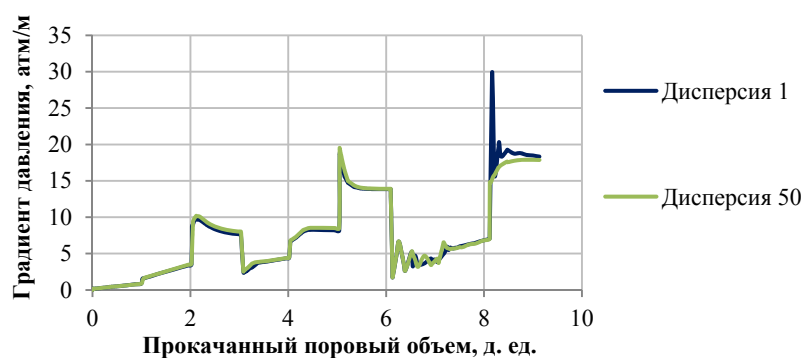


Рис. 10. Зависимость результатов расчета на модели типа Б (со средними ячейками) от дисперсии

Fig. 10. Dependence of the calculation results on the B-model (medium) on the variance

Для модели типа Б (со средними ячейками) заметная чувствительность от дисперсии наблюдается только по градиенту давления — значительные пики на графике сглаживаются при увеличении дисперсии (рис. 10). Зависимости динамики вытеснения от дисперсии не наблюдается. Уменьшение дисперсии практически не влияет на результат расчета.

После увеличения дисперсии увеличился набор чувствительных параметров. Основным инструментом адаптации также остается форма кривых ОФП, однако теперь модель чувствительна к значению фактора остаточного сопротивления среды (ζ_R) (рис. 11); чувствительность сохраняется и для адаптации градиента давления, и для динамики вытеснения. Для модели А (с крупными ячейками) в соответствии с данными лабораторных экспериментов была модифицирована форма кривых ОФП и значения конечных точек, а также снижено значение

фактора остаточного сопротивления. Для адаптации модели типа Б также потребовалось изменение формы кривых ОФП, однако значения конечных точек сохранились исходными, снижение ζ_R было менее значительным. Также дополнительно оценена чувствительность моделей к коэффициенту степенной зависимости вязкости от скорости сдвига (рис. 12).

Влияние фактора остаточного сопротивления в данной модели объясняется изменением проницаемости из-за адсорбции полимера, а соответственно, и изменением траектории движения флюида в образце. Для наименее детальной модели типа А возникла необходимость изменения значений конечных точек ОФП. Для модели типа В (с мелкими ячейками) такой необходимости не возникло. Основным чувствительным параметром являлось значение фактора остаточного сопротивления среды. Также наблюдалась слабая чувствительность к изменению кривых ОФП. Адаптация производилась только для градиента давления, т. к. по динамике вытеснения результат близок к лабораторным значениям (рис. 13-14).

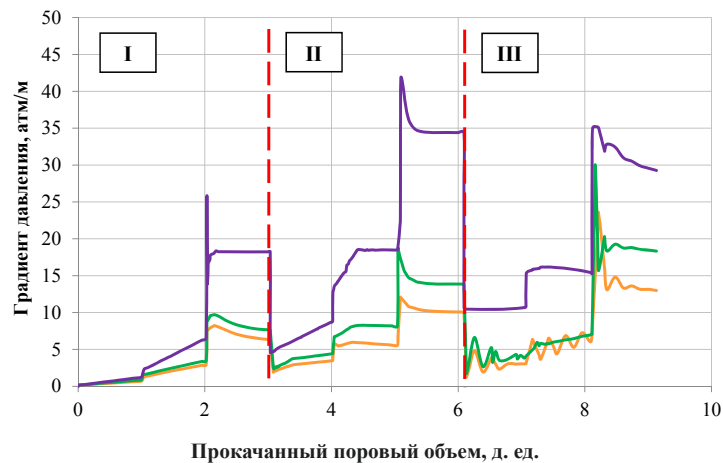
Результаты расчета лежат в пределах экспериментальных значений зависимости вязкости от скорости сдвига. Это говорит о том, что в модели корректно реализуется необходимая нелинейность, связанная с неньютоновскими свойствами полимерного раствора. Вязкость на рис. 15 нормирована на максимальное значение в экспериментах.

Благодаря реализованной в модели неоднородности по проницаемости можем наблюдать неравномерный фронт вытеснения. На рис. 16 показана доля подвижной нефти в образце. В одномерных и трехмерных моделях средние значения нефтенасыщенности на один момент времени равны. В 1D-модели подвижная нефть сосредоточена в районе стока, и фронт обводнения отличается от 3D-модели. Этот пример показывает, что модели, имеющие качественно и количественно близкую степень адаптации, могут иметь принципиальные отличия в наборе варьируемых параметров, интерпретировать которые весьма затруднительно.

На рис. 17 показан поперечный слой на момент времени прокачивания двух поровых объемов и сравнение поля нефтенасыщенности в случае вытеснения водой и полимерным раствором. Разница в распределении нефтенасыщенности демонстрирует изменение линий тока. Приведенные значения средней нефтенасыщенности по всей модели показывают степень изменения за один и тот же момент времени.

Несмотря на то, что выше описаны результаты и настройка только для длительного исследовательского теста, в ходе адаптации все модели настраивались одновременно. Это позволяет создать единую физическую основу для всех используемых моделей экспериментов.

Отмечена сложность настройки динамики вытеснения на модели типа А (с крупными ячейками): приходится адаптировать влияние неоднородности за счет смещения конечных точек и изменения формы кривых ОФП, аналогично 1D-модели. Увеличение количества ячеек в 3D-модели приводит к улучшению



I: вытеснение нефти полимерным раствором — 700 ppm (при прогреве пласта до 50 °С)

II: довытеснение нефти полимерным раствором — 1 500 ppm (50 °С)

III: довытеснение нефти полимерным раствором — 1 500 ppm (80 °С)

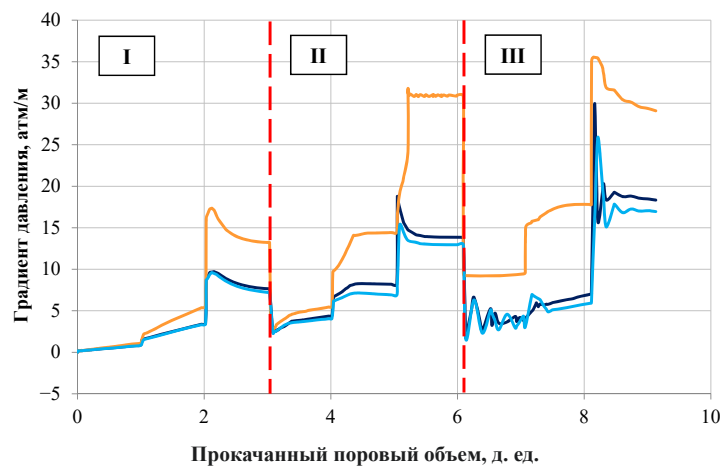
— фактор ОС 1

— фактор ОС 1,3

— фактор ОС 1,9

Рис. 11. Анализ чувствительности модели типа Б (со средними ячейками) к фактору остаточного сопротивления среды (градиент давления)

Fig. 11. Sensitivity analysis of the B-model (medium) to the resistance factor of the medium (pressure gradient)



— коэффициент 1,8

— коэффициент 0,5

— коэффициент 2,2

Рис. 12. Анализ чувствительности модели типа Б (со средними ячейками) к коэффициенту степенной зависимости вязкости от скорости сдвига (градиент давления)

Fig. 12. Sensitivity analysis of the B-model (medium) to the coefficient of the power dependence of viscosity on shear rate (pressure gradient)

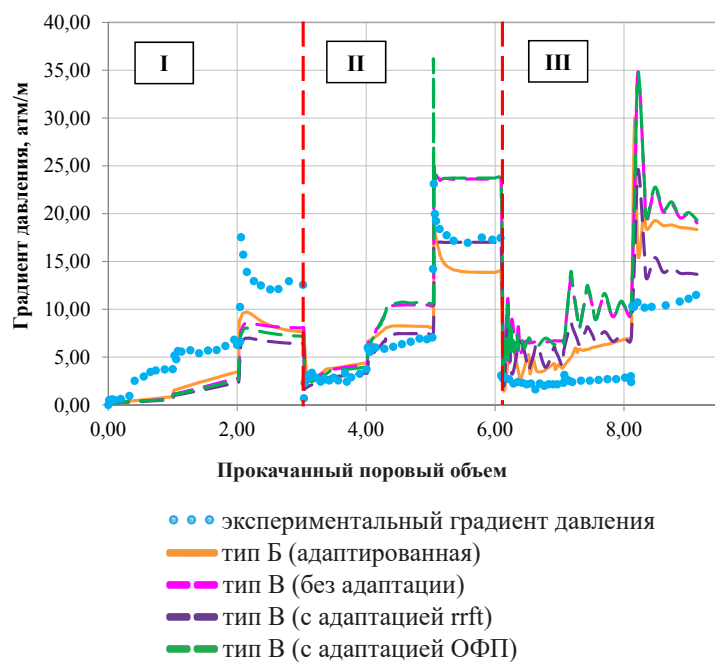


Рис. 13. Адаптация 3D-модели типа В (градиент давления)

Fig. 13. 3D B-model adapting (pressure gradient)

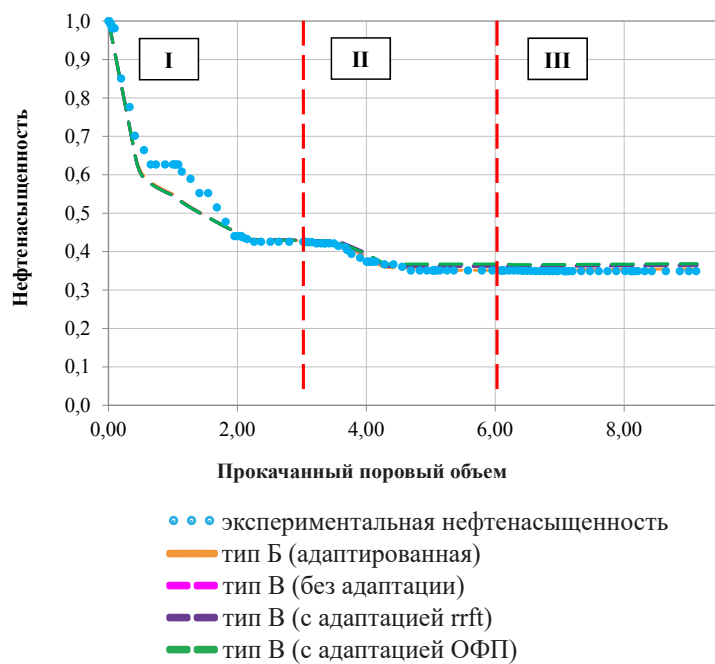


Рис. 14. Адаптация 3D-модели типа В (вытеснение)

Fig. 14. 3D B-model adapting (oil displacement)

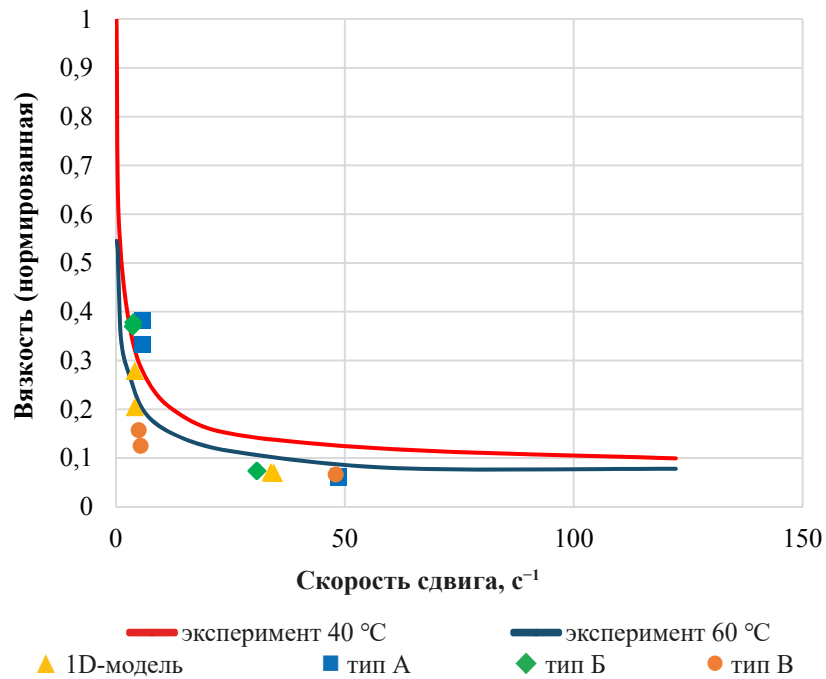


Рис. 15. Сравнение результатов расчета на моделях с экспериментальными данными, полученными при определении зависимости вязкости от скорости сдвига

Fig. 15. Comparison of model calculation results with experimental data obtained in determining viscosity dependence on shear velocity

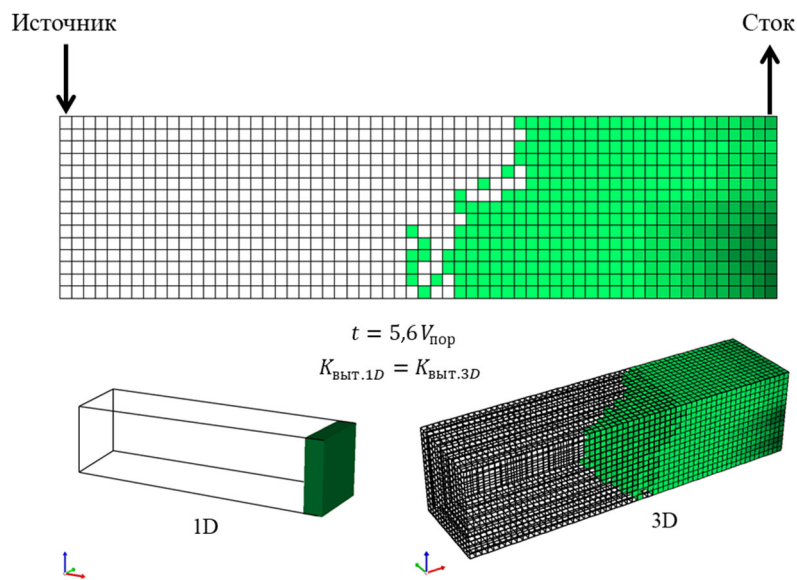


Рис. 16. Фронт вытеснения (сравнение 1D и 3D-моделей)

Fig. 16. Oil displacement front (comparison 1D and 3D models)

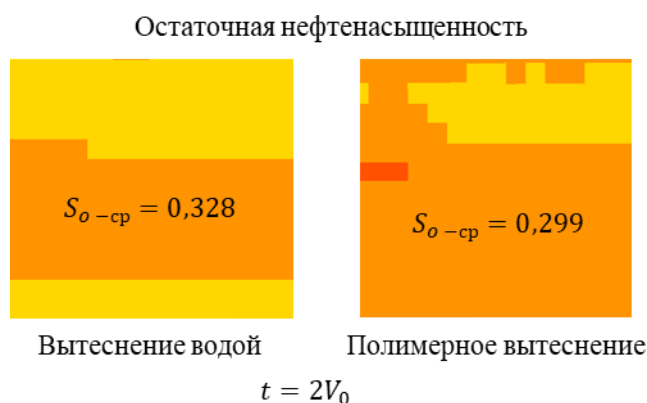


Рис. 17. Фронт вытеснения (поперечный слой 3D-модели). Сравнение закачки воды и полимера

Fig. 17. Oil displacement front (transverse layer of 3D model). Comparison water and polymer flooding

настройки характера вытеснения и градиента давления. С уменьшением дисперсии распределения параметров неоднородности, результаты моделирования 3D-моделей приближаются к результатам 1D-моделей, позволяя при этом получить результат адаптации с меньшей погрешностью.

При сравнении результатов расчетов на моделях (рис. 18-19) отмечено, что модель типа Б (со средними ячейками) настраивается с меньшей погрешностью как по динамике вытеснения, так и по давлению. Результат настройки динамики вытеснения практически совпадает на всех моделях. Модель типа А (с крупными ячейками) по динамике вытеснения настраивается за счет изменения большего количества параметров, что приводит к сильному расхождению данных модели и результатов лабораторных исследований. Модель типа В (с мелкими ячейками) имеет меньшее количество чувствительных параметров. Полученные на последней итерации итоговые параметры гидродинамических моделей — коэффициент степенной зависимости вязкости от скорости сдвига, фактор остаточного сопротивления, параметры адсорбции — задавались идентично для всех моделей. Итоговые наборы варьируемых параметров и модели, на которых этот параметр был уточнен, представлены в таблице 4.

Высокая погрешность адаптации модели В (рис. 19) на первом этапе может быть связана с неопределенностью ОФП, поскольку на этом этапе реализуется в основном двухфазное течение. Третий этап, где расчетный градиент давления завышен, может быть объяснен более низкой зависимостью адсорбции от концентрации при высокой температуре. Это приводит к более высоким значениям вязкости водного раствора полимера. Показанный подход позволяет разделить и проанализировать влияние факторов на процесс вытеснения нагретым полимерным раствором. Нужно отметить, что полученный итоговый набор варьируемых параметров (ОФП) зависит от размерности сетки гидродинамической модели.

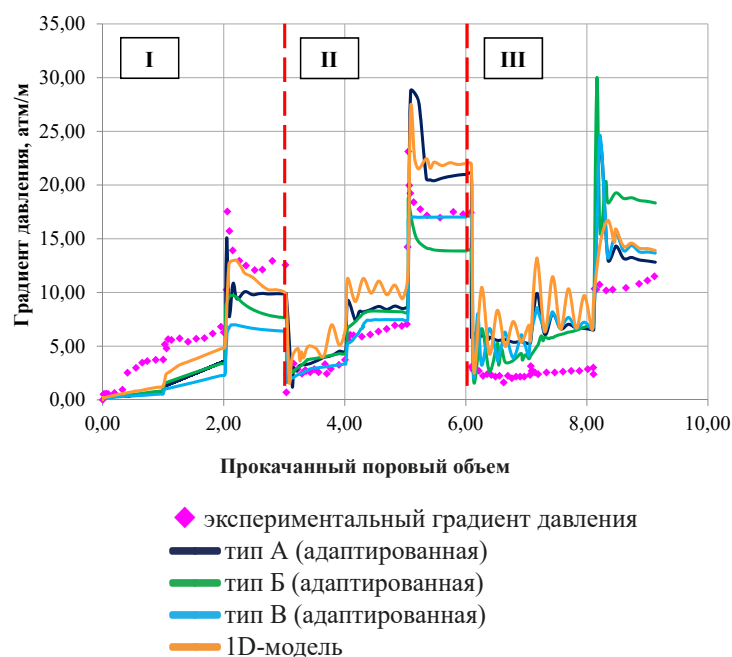


Рис. 18. Сравнение результатов расчета на моделях с фактом (градиент давления)

Fig. 18. Comparison of model calculation results with fact (pressure gradient)

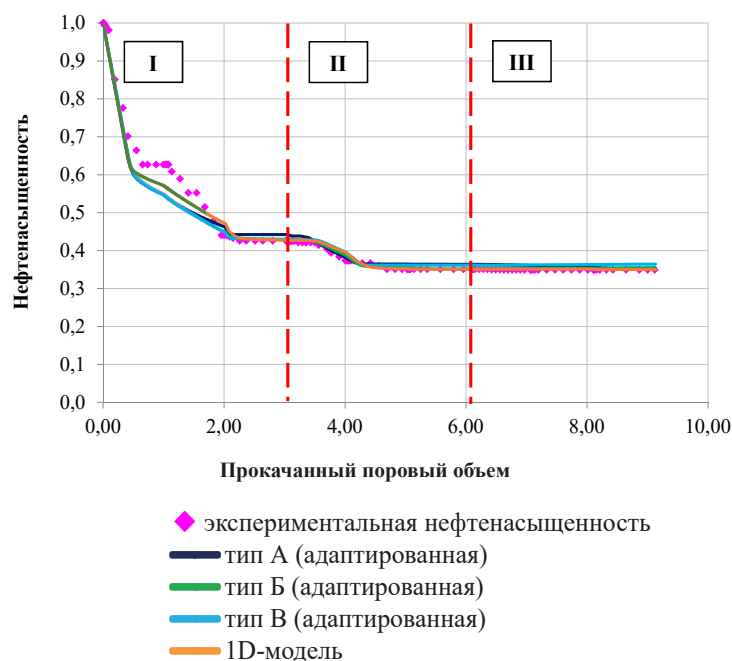


Рис. 19. Сравнение результатов расчета на моделях с фактом (вытеснение)

Fig. 19. Comparison of model calculation results with fact (oil displacement)

Таблица 4

Итоговые наборы варьируемых параметров

Table 4

Final sets of variable parametres

1D	3D
1. Форма кривых ОФП 2. Значения ОФП в конечных точках	1. Форма кривых ОФП 2. Фактор остаточного сопротивления среды (в модели типа В, с мелкими ячейками) 3. Значения ОФП в конечных точках (в модели типа А, с крупными ячейками)

Результаты

В ходе работы был применен итерационный подход к адаптации гидродинамических моделей лабораторных экспериментов. Удалось подобрать минимальное количество варьируемых параметров для каждой модели.

Так как выравнивание фронта вытеснения зависит от подвижности фаз, то основным инструментом адаптации являлась модификация кривых ОФП и вязкости полимерного раствора. Воспроизведение результатов экспериментов на синтетических моделях показало высокую чувствительность к форме функций ОФП. Это связано в том числе с пространственно упрощенным представлением в 1D-моделях. Характер движения флюидов в данном случае можно описать как «поршневое» вытеснение.

Для апробации дополнительно была проведена адаптация синтетических гидродинамических моделей лабораторных экспериментов по определению ОФП на стационарном режиме и определению динамической адсорбции. Значения параметров адаптации задавались в соответствии с полученными в итерационном алгоритме. В результате потребовалась только настройка ключевых для данных экспериментов параметров: формы кривых ОФП — в первом случае и параметров адсорбции и десорбции — во втором.

Основные моменты и выводы, полученные в рамках выполненной работы:

1. Моделирование всех экспериментов проводилось в концепции минимизации варьируемых параметров адаптации. В процессе было суммарно создано 24 варианта адаптации 6 моделей. Все гидродинамические модели экспериментов адаптировались итерационно, что привело к уточнению значений варьируемых параметров для масштабирования на секторные/полномасштабные модели.
2. Применение неоднородных синтетических 3D-моделей для имитации лабораторных экспериментов по вытеснению нагретым водным раствором полимера позволяет получить более реалистичную динамику и давления, чем в случае 1D-моделей. Это можно объяснить изменением течения флюидов, которое происходит из-за снижения проницаемости за счет адсорбции.

3. Необходимость создания стохастически неоднородной синтетической модели показывает важность учета реальной структуры неоднородности лабораторных образцов за счет томографии. Это позволит уменьшить неопределенность результатов моделирования лабораторных экспериментов.
4. Моделирование сложного процесса фильтрации нефти и полимерного раствора в условиях изменения температуры, концентрации полимера и адсорбции без учета реальной неоднородности сопровождается использованием для адаптации интегральных параметров, не предполагающих однозначную интерпретацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закиров С. Н. Нетрадиционные результаты экспериментов по вытеснению вязких нефтей различными рабочими агентами и их обработка / С. Н. Закиров, В. А. Николаев, Э. С. Закиров, И. М. Индрупский, А. С. Рассохин // Георесурсы, геознергетика, геополитика. 2010. № 2 (2). С. 23.
2. Каневская Р. Д. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов / Р. Д. Каневская. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 140 с.
3. Котяхов Ф. И. Физика нефтяных и газовых коллекторов / Ф. И. Котяхов. М.: Недра, 1977. 287 с.
4. Орлов Д. М. Методика определения относительных фазовых проницаемостей по данным нестационарной фильтрации путем совместного физического и компьютерного моделирования / Д. М. Орлов, А. Е. Рыжов, Т. А. Перунова // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Том 54. № 5 (321). С. 119-128.
5. ОСТ 39-195-86. Нефть. Метод определения коэффициента вытеснения нефти водой в лабораторных условиях. М., 1986. 20 с.
6. Плохотников С. П. Математическое моделирование неизотермической двухфазной фильтрации с модифицированными относительными фазовыми проницаемостями / С. П. Плохотников, О. И. Богомолова, Д. С. Плохотников, В. А. Богомолов, О. Р. Плохотникова, М. С. Нурсубин // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Том 16. № 21. С. 122-124.
7. РД 39-8148311-206-85. Руководство по проектированию и технико-экономическому анализу разработки нефтяных месторождений с применением метода полимерного воздействия на пласт. М., 1985. 209 с.
8. Хижняк Г. П. Результаты лабораторных исследований по полимерному вытеснению нефти / Г. П. Хижняк, Н. Ю. Балуева, В. А. Мордвинов, И. Р. Юшков // Вестник Пермского государственного технического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2006. Том 5. № 1. С. 122-125.
9. Ahmad Ali Manzoor. Modeling and simulation of polymer flooding with time-varying injection pressure / Ahmad Ali Manzoor // ACS Omega. 2020. Vol. 5. No. 10. Pp. 5258-5269. DOI: 10.1021/acsomega.9b04319
10. Potcharaporn Pongthunya. Upscaling in Polymer Flooded Reservoirs: PhD thesis / Potcharaporn Pongthunya. Imperial College London, 2013. 233 p.

Anatoliy V. STEPANOV¹

Irina A. ZUBAREVA²

Evgeniy R. VOLGIN³

UDC 622.276

**HYDRODYNAMIC MODELING
OF LABORATORY EXPERIMENTS
RELATED TO OIL DISPLACEMENT
WITH THERMOPOLYMER SOLUTION**

¹ Cand. Sci. (Phys.-Math.),
Expert, Tyumen Petroleum Research Center
avstepanov5@rosneft.ru

² Undergraduate Student,
Department of Applied and Technical Physics,
Institute of Physics and Technology,
University of Tyumen;
Specialist, Tyumen Petroleum Research Center
iazubareva-tnk@rosneft.ru

³ Chief Specialist, Rosneft Oil Company (Moscow)
ervolgin@rosneft.ru

Abstract

Microscaled modeling of laboratory experiments, which needs adaptation a number of parameters of numerical model of a composite kern building, uses for the applying results of flowing laboratory experiments in sector and full hydrodynamic models of occurrences. Adaptation of parameters of numerical kern model shall be carried out at reproduction measured variables of flowing experiments. Moreover, there are uncertainties of filtration and capacitance properties related to heterogeneity of kern samples and instability of heated

Citation: Stepanov A. V., Zubareva I. A., Volgin E. R. 2022. "Hydrodynamic modeling of laboratory experiments related to oil displacement with thermopolymer solution". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 2 (30), pp. 77-100.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-77-100

polymer' displacement front. Iteration algorithm is developed and implemented in this article. Algorithm provides adapting of series synthetic hydrodynamic models of laboratory experiments. At the first adapting step the whole range of uncertainties of a series of laboratory experiments is taken into account. Minimization of number of variable parameters and model' adaptation error realizes on all iteration steps. To increase the reliability of adaptation, the spectrum of 1D models is supplements with synthetic 3D models with stochastic distribution of heterogeneity in porosity and permeability. This process allows take processes of filtration in polymer adsorption conditions and heterogeneity of collector properties into account more fully while modeling. In addition, it can help to specify variable parameters with scaling on different numerical grids. Developed algorithm tested on heated polymer' displacement experiments, determination of the relative phase permeability as a function of temperature. Decreased uncertainties of variable parameters, which are relative phase permeability as a function of concentration of polymer solution, residual resistance factor, dependence of the viscosity of the polymer solution on the shear rate, is the results of method's application. Then these results transfers to the adaptation process of sector and full hydrodynamic models.

Keywords

Enhanced oil recovery methods, thermopolymer solution, iteration method, hydrodynamic modeling, optimization, laboratory experiments, systematization.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-2-77-100

REFERENCES

1. Zakirov S. N., Nikolaev V. A., Zakirov E. S., Indrupskiy I. M., Rassokhin A. S. 2010. "Unconventional results and interpretation of displacement experiments for oils with increased viscosity using different displacing agents". *Georesources, Geoenergy, Geopolitics*, no. 2 (2), p. 23. [In Russian]
2. Kanevskaya R. D. 2003. *Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposits development*. Moscow; Izhevsk: Institute of computer science. 140 p. [In Russian]
3. Kotyakhov F. I. 1997. *Physics of oil and gas collectors*. Moscow: Nedra. 287 p. [In Russian]
4. Orlov D. M., Ryzhov A. E., Perunova T. A. 2013. "Method for determining relative permeabilities from data on unsteady filtration by combined physical and computer modeling". *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 54, no. 5, pp. 789-797. DOI: 10.1134/S002189441305012X [In Russian]
5. OST 39-195-86. 1986. *Oil. Method for determining the oil displacement coefficient by water in laboratory conditions*. Moscow. 20 p. [In Russian]
6. Plokhotnikov S. P., Bogomolova O. I., Plokhotnikov D. S., Boomolov V. A., Plokhotnikova O. R., Nursubin M. S. 2013. "Mathematical modeling of non-isothermal two-phase filtration with modified relative phase permeabilities". *Kazan Technological University Herald*, vol. 16, no. 21, pp. 122-124. [In Russian]

7. RD 39-8148311-206-85. 1985. Guidelines for the design and technical and economic analysis of the development of oil fields using the method of polymer impact on the formation. Moscow. 209 p. [In Russian]
8. Khiznyak G. P., Balueva N. Y., Mordvinov V. A., Yushkov I. R. 2006. "Results of laboratory studies on polymer displacement of oil". Perm State Technical University Herald. Geology. Oil and gas gambling, vol. 5, no. 1, pp. 122-125. [In Russian]
9. Ahmad Ali Manzoor. 2020. "Modeling and simulation of polymer flooding with time-varying injection pressure". ACS Omega, vol. 5, no. 10, pp. 5258-5269. DOI: 10.1021/acsomega.9b04319
10. Potcharaporn Pongthunya. 2013. Upscaling in polymer flooded reservoirs: PhD thesis. Imperial College London. 233 p.