

На правах рукописи

ТИМОШЕНКО ИВАН ЕВГЕНЬЕВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРДИСПЕРСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА
НЕФТЯНЫЕ ПЛАСТЫ**

Специальность

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тюмень – 2004

Работа выполнена в лаборатории математического моделирования процессов фильтрации Института механики и машиностроения Казанского научного центра РАН.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Никифоров Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Федоров Константин Михайлович, г. Тюмень
кандидат физико-математических наук
Закиров Рустам Харисович, г. Казань

Ведущая организация: Пермский государственный университет,
г. Пермь

Защита состоится “ 08 ” сентября 2004 года, в 15⁰⁰ часов на заседании
Диссертационного совета Д 212.274.09 в Тюменском государственном университете, по
адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, д. 15^А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного
университета.

Автореферат разослан “ ” июля 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Татосов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Поздняя стадия разработки нефтяных месторождений с сильно выраженной неоднородностью нефтесодержащих коллекторов характеризуется наличием обширных промытых высокопроницаемых зон. По промытым участкам фильтруются основные массы закачиваемой воды, не оказывая существенного влияния на выработку малопроницаемых участков и пропластков. В настоящее время разработаны методы увеличения нефтеотдачи, основанные на ограничении притока воды в высокопроницаемые зоны и повышении фильтрационного сопротивления в этих областях. В частности, широко применяются потокоотклоняющие технологии с применением полимердисперсных систем (ПДС). Их сущность заключается в последовательной закачке оторочек воды слабоконцентрированного раствора полимера (обычно полиакриламида) и воды, содержащей дисперсные частицы твердой фазы (частицы горных пород).

Однако до сих пор технологии с применением ПДС не имели надлежащего математического описания, позволяющего прогнозировать воздействие ПДС на нефтяной пласт.

Между тем математическое описание этого процесса является важной задачей, позволяющей оценить эффективность применения данного метода, прогнозировать нефтеотдачу и уменьшить риск неэффективного применения технологии. Поэтому исследования, выполненные в диссертационной работе, являются актуальными и имеют важное практическое значение.

Цель работы

Целью настоящей диссертационной работы является разработка математической модели заводнения нефтяных пластов с применением ПДС через систему скважин, учитывающей изменения структуры порового пространства и состава частиц в фильтрационном потоке при их взаимодействии с пористым скелетом и между собой; выполнение сопоставления с данными лабораторного эксперимента; создание численных алгоритмов и расчетных программ для решения задач технологии повышения нефтеотдачи с применением ПДС и проведение вычислительных экспериментов.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель заводнения нефтяных пластов с применением ПДС, которая представлена уравнениями неразрывности и движения (импульсов) для случая двухфазной фильтрации жидкости с активными примесями.
2. Получены замыкающие соотношения на основе модельного представления пористой среды в виде пучка цилиндрических капилляров различных радиусов. При этом пористая среда характеризуется функцией распределения пор по размерам, а дисперсная примесь – функцией распределения частиц по объёмам.
3. Определены коэффициенты уравнения для функции распределения пор по размерам на основе диффузионного приближения, описывающего осаждение дисперсной примеси на стенки капилляров, и допущений, положенных в основу определения блокирования капилляров. При записи коэффициентов для функции распределения частиц по объёмам учтено изменение состава и количества частиц за счет конвективного переноса, осаждения частиц на стенки капилляров и их удержания при блокировании, а также за счет объединения и роста частиц.
4. Численное решение получено на основе конечно-элементного метода контрольных объемов. Составлены алгоритмы и программы расчетов.
5. Проведены вычислительные эксперименты по определению влияния процессов объединения и роста частиц на динамику изменения дисперсионного состава частиц при различных значениях интенсивности осаждения и блокирования.
6. Выполнено сравнение результатов численного моделирования с данными двух серий лабораторных экспериментов: 1) по изучению влияния дисперсной фазы на скорость образования флоккул (агрегатов) и определению распределения глинополимерных агломератов по размерам; 2) по исследованию влияния ПДС на поровое пространство в насыпных моделях нефтяных пластов.
7. Рассмотрены численные примеры полимердисперсного заводнения для различных моделей неоднородных пластов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель заводнения нефтяных пластов с применением технологии полимердисперсного заводнения, основанная на использовании функций распределения пор по размерам и частиц по объёмам и модельном представлении пористой среды в виде пучка цилиндрических капилляров.

2. Численные алгоритмы и результаты расчетов воздействия ПДС на пористую среду. Результаты расчетов заводнения неоднородных нефтяных пластов с применением ПДС.

Достоверность результатов

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается:

- 1) математической моделью, основанной на общих законах и уравнениях механики сплошной среды;
- 2) тщательностью анализа физических процессов моделируемых явлений;
- 3) справедливостью используемых упрощений и приближений;
- 4) выполненным сравнением результатов математического моделирования с данными лабораторных экспериментов.

Практическая ценность

Разработанная математическая модель заводнения неоднородных нефтяных пластов с применением полимердисперсных систем позволяет прогнозировать результаты воздействия и может быть использована в нефтедобывающих организациях в предпроектных исследованиях и при принятии решений при проектировании методов повышения нефтеотдачи пластов с использованием полимердисперсных систем.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-практической конференции VII Международной выставки “Нефть, газ - 2000” (Казань, 2000 г.); на VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике УрО РАН (Пермь, 2001 г.); на Юбилейной научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 50-летию УНЦ РАН и 10-летию АН РБ “Молодые ученые Волго-Уральского региона на рубеже веков” (Уфа, 2001 г.); на научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Республики Татарстан (Казань, 2001 г.); на IX Всероссийской конференции “Структура и динамика молекулярных систем”, (Яльчик, 2002 г.); на XII Европейском симпозиуме “Повышение нефтеотдачи пластов” (Казань, 2003 г.); на Итоговой конференции КазНЦ РАН 2003 (Казань 2004 г.).

По результатам диссертации опубликовано 6 работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 121 страницу машинописного текста, включая 37 рисунков и список литературных ссылок из 111 наименований. В конце каждой главы даются краткие выводы по содержанию раздела. В заключении сформулированы основные результаты работы.

Краткое содержание работы

Во введении кратко поясняются процессы, происходящие при дренировании водонефтяной залежи. На основании выполненных исследований обоснована актуальность и сформулирована цель диссертационной работы. Поставлены основные задачи и определены методы их решения. Изложены защищаемые положения и результаты, их научная новизна, а также представлены результаты апробации работы.

Первая глава содержит описание основных способов поддержания уровней и интенсификации отборов нефти. Дана краткая классификация самих коллекторов, описаны их основные характеристики – пористость и проницаемость, а также индивидуальные характеристики пор в различных типах коллекторов.

Описаны типы и даны краткие характеристики макронеоднородностей нефтеносных пластов, приводящих к неравномерности потоков жидкости и снижающие охват пластов рабочими (вытесняющими) агентами. Рассмотрены способы обнаружения макронеоднородностей. Описаны некоторые методы извлечения остаточных запасов нефти, дана их краткая классификация. Приведены проблемы препятствующие реализации этих методов. Рассмотрены некоторые широко применяемые методы и выявлены их основные характеристики. Описаны физические и химические механизмы, лежащие в основе этих методов.

Подробно рассмотрен метод, основанный на использовании флокулирующих свойств высокомолекулярных полимеров относительно твердых дисперсных частиц, приводящих к образованию ПДС. Рассмотрены процессы флокуляции и коагуляции в этих системах и механизм взаимодействия полимера с породами и дисперсными частицами в пластовых условиях. Эти процессы приводят к существенным изменениям

свойств пористой среды, следствием чего является отклонение фильтрационных потоков в зоны с низкой проницаемостью и увеличение коэффициента извлечения нефти.

Кратко затронуты вопросы математического моделирования физико-химического заводнения, где кроме нефти и воды вводится третья компонента – активная примесь; описаны решения и трудности численного решения этой задачи, обусловленные появлением концентрации примеси. Сказано о трудностях моделирования кинетики осаждения дисперсных примесей и блокирования пор. Описаны различные подходы к моделированию пористой среды и дано их обобщение.

Вторая глава содержит описание математической модели процессов, происходящих в фильтрационном потоке и пористой среде при полимердисперсном заводнении нефтяных пластов. В модели учтены изменения пористой среды, описываемые функцией распределения пор по размерам, и дисперсной системы описываемые функцией распределения частиц по объемам.

Законы сохранения массы и импульсов являются содержанием пункта 2.1. Пористая среда представлена двумя взаимопроникающими континуумами, каждый из которых характеризуется своей пористостью m_i ($i=1,2$):

$$m_1 + m_2 = m \quad (1)$$

Уравнения сохранения масс фаз и компонентов

для первого континуума:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(m_1 S_{1o}) + \operatorname{div} \mathbf{V}_o &= -q_o, \\ \frac{\partial}{\partial t}(m_1 S_{1w}) + \operatorname{div} \mathbf{V}_w &= -q_w; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(C_{11} m_1 S_{1w}) + \operatorname{div}(C_{11} \mathbf{V}_w) &= -q_{11}, \\ \frac{\partial}{\partial t}(C_{12} m_1 S_{1w}) + \operatorname{div}(C_{12} \mathbf{V}_w) &= -q_{12}; \end{aligned} \quad (3)$$

где \mathbf{V}_i - скорости фильтрации i -ой фазы; S_{1o} и S_{1w} - нефтенасыщенность и водонасыщенность первой среды: $S_{1o} + S_{1w} = 1$ ($0 \leq S_{1o} \leq 1$); C_{1j} - объемная концентрация j -го компонента в первом континууме; j – номер компонента ($j=1$ – соответствует полимеру, $j=2$ – дисперсной примеси); q_i - интенсивность перетока i -ой фазы из подвижного континуума в неподвижный; индекс $i=0$ соответствует нефти, $i=w$ – воде; q_{1j} - интенсивность изъятия j -го компонента из подвижного (индекс 1) континуума.

для второго континуума:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_2 S_{2o}) = q_o,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_2 S_{2w}) = q_w; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_{21} m_2 S_{2w}) = q_{21},$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(C_{22} m_2 S_{2w}) = q_{22}; \quad (5)$$

где S_{2o} и S_{2w} - нефтенасыщенность и водонасыщенность второй среды: $S_{2o} + S_{2w} = 1$; C_{2j} - концентрация j -го компонента во втором континууме; q_{2j} - интенсивность перехода j -го компонента в неподвижный континуум.

Уравнения движения фаз записаны в виде обобщенного закона Дарси:

$$\mathbf{V}_o = -\frac{K_o}{\mu_o} \text{grad}(P),$$

$$\mathbf{V}_w = -\frac{K_w}{\mu_w} \text{grad}(P) \quad (6)$$

Здесь P – давление; μ_i - динамическая вязкость; $K_i = kf_i$ - фазовая проницаемость, k – абсолютная проницаемость пласта; f_i - относительная фазовая проницаемость.

Описаны допущения, принятые для построения замыкающих соотношений.

В пункте 2.2 в виде так называемых “уравнений сплошности” записаны уравнения, описывающие изменения функций распределения пор по размерам и частиц по объемам за счет изменения параметров пористой среды при взаимодействии полимера и частиц как между собой, так и с пористой структурой.

Для функции распределения пор:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r}(u_r \varphi) + u_\eta = 0, \quad (7)$$

где индивидуальность процесса определяется скоростями изменения радиусов поровых каналов за счет осаждения u_r и закупоривания (блокирования) u_η пор.

Для оценки скоростей сужения и блокирования поровых каналов реальная пористая среда смоделирована системой цилиндрических капилляров различных радиусов, способных удерживать частицы (агрегаты), образующиеся в результате взаимодействия полимера и дисперсной фазы.

Скорость сужения поровых каналов из-за осаждения частиц получена на основе диффузионного приближения:

$$u_r = -C_{12}S_{1w} \left(\frac{2V_m D^2}{rL} \right)^{1/3}, \quad (8)$$

где V_m – средняя скорость движения жидкости в поровом канале, которая связана с суммарной скоростью фильтрации V соотношением:

$$V_m = \frac{|V|r^2}{8\zeta \left(\frac{K_o}{\mu_o} + \frac{K_w}{\mu_w} \right) (\mu_o S_{1o} + \mu_w S_{1w})}, \quad (9)$$

где ζ - коэффициент извилистости капилляра.

Скорость блокирования пор получена комбинацией закона Пуазейля для капилляра и закона Дарси для элемента пористой среды, представленного пучком капилляров. Предполагалось, что доля заблокированных капилляров пропорциональна количеству частиц, попавших с потоком в каналы, размер которых удовлетворяет условию блокирования:

$$u_\eta = \beta C_{12} S_{1w} \phi V_m \frac{\int_0^\infty \psi(v) dv}{\int_0^\infty \psi(v) dv}, \quad (10)$$

где коэффициент пропорциональности β : ($\beta > 0$) можно назвать коэффициентом формы частиц.

Для функции распределения частиц:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial v} (u_v \psi) - u_\xi = 0, \quad (11)$$

где u_v и u_ξ будут соответственно скоростью укрупнения агрегатов и интенсивностью изменения количества частиц одного типоразмера в потоке.

Скорость укрупнения частиц определена исходя из экспериментальных фактов и имеет вид:

$$u_v = \gamma (v^* - v) (C_{11}^* - C_{11}) C_{11} C_{12}, \quad (12)$$

где звездочкой помечены предельные (критические) значения концентрации полимера, а также размера частиц, при достижении которых взаимодействие прекращается.

Интенсивность изменения числа частиц представлена в виде трех слагаемых:

$u_\xi = u_\xi^m + u_\xi^a + u_\xi^c$, где первое слагаемое отвечает за конвективный перенос частиц:

$$u_\xi^m = \frac{\partial \psi}{\partial t} = - \frac{1}{m_1 S_{1w}} V_w \text{grad}(\psi), \quad (13)$$

второе – за осаждение на поверхности пор:

$$u_{\zeta}^a = q_c^r \psi = 2m_1 \frac{\psi \int_0^{\infty} r u_r \varphi dr}{\int_0^{\infty} r^2 \varphi dr}, \quad (14)$$

третье – за объединение агрегатов между собой, оно введено в виде уравнения Смолуховского:

$$u_{\zeta}^c = \frac{1}{2} \int_0^v \theta(v-v_1, v_1) \psi(v-v_1) \psi(v_1) dv_1 - \int_0^{\infty} \theta(v, v_1) \psi(v) \psi(v_1) dv_1, \quad (15)$$

где $\theta = \xi C_{11} C_{12} [(v-v_1) + v_1]$ – ядро коагуляции, которое считается известной функцией слияния частиц, v, v_1 – размер агрегата после коагуляции и размер присоединенного агрегата соответственно.

В пункте 2.3 приведены интенсивности перетока между континуумами для воды:

$$q_w = S_{1w} m_1 \int_0^{\infty} u_{\eta} r^2 dr / \int_0^{\infty} \varphi r^2 dr \quad (16)$$

для нефти:

$$q_o = (1 - S_{1w}) m_1 \int_0^{\infty} u_{\eta} r^2 dr / \int_0^{\infty} \varphi r^2 dr \quad (17)$$

для примесей:

$$q_{11} = C_{11} q_w + q_{21} \text{ (полимер)}, \quad (18)$$

где $q_{21} = \frac{\partial a}{\partial t}$, a – масса адсорбированного полимера, которая определяется изотермой сорбции

$$q_{12} = C_{12} q_w + q_{22} \text{ (частицы)}, \quad (19)$$

где интенсивность осаждения агрегатов $q_{22} = q_c^r$.

Изменения основных фильтрационно-емкостных характеристик пласта – пористости и проницаемости – представлены следующими выражениями:

$$m_1 = \bar{m} m_1^0 = m_1^0 \int_0^{\infty} r^2 \varphi dr / \int_0^{\infty} r^2 \varphi^0 dr \quad (20)$$

$$k_1 = \bar{k} k^0 = k^0 \int_0^{\infty} r^4 \varphi dr / \int_0^{\infty} r^4 \varphi^0 dr \quad (21)$$

Численный метод решения данной задачи описан в пункте 2.5. Использован конечно-элементный метод контрольных объемов, согласно которому исследуемая область разбивалась на конечное число неперекрывающихся элементов (подобластей).

На каждой подобласти искомые функции аппроксимируются кусочно-линейными функциями. Уравнения проинтегрированы с учетом характеристических направлений и с использованием “лампинг-подхода”, чтобы избежать нефизичных осцилляций в решении уравнений для насыщенности и концентрации. Для большей устойчивости решения кинетические соотношения, описывающие изменения функций распределения пор по размерам и частиц по объемам, аппроксимируются по неявной схеме с учетом характеристических направлений. Описан алгоритм, который был использован при вычислении, и приведена блок-схема разработанного алгоритма вычисления.

Третья глава посвящена решению ряда задач фильтрации при воздействии ПДС и анализу полученных результатов. В пункте 3.1 выполнен анализ влияния коэффициентов, входящих в уравнения для функций распределения пор по размерам и частиц по объемам. На примере воздействия монодисперсной примеси на пористую среду изучены процессы сужения и блокирования пор и изменение дисперсной примеси в процессе взаимодействия с полимером.

Сравнение результатов численных расчетов с данными двух серий лабораторных экспериментов выполнены в пункте 3.2. Первая серия посвящена оценке флокулирующих свойств различных полимеров, изучению влияния дисперсной фазы на скорость образования флоккул (агрегатов) и определению распределения глинополимерных агломератов по размерам. Во второй серии на насыпных моделях исследовалось влияние ПДС на поровое пространство. На рисунке 1 приведено сравнение функции распределения частиц по размерам для случая различных ядер в уравнении Смолуховского с экспериментальной кривой. На рисунке 2 сопоставлены расчетные данные и данные эксперимента для функции распределения пор по размерам при воздействии ПДС. Результаты расчетов показывают качественное и количественное совпадение экспериментальных и расчетных данных. Накопление крупных частиц (рис. 1) на правой границе расчетного диапазона связано с предельным значением их размера, который определяется максимальным размером пор. Различие в области малых значений размера пор (рис. 2) объясняется учетом “недоступного порового объема”. Такие поры не сужаются, а из-за сужения крупных число недоступных пор растет.

В пунктах 3.3 и 3.4 проведен сравнительный численный анализ воздействия чистым раствором полимера и полимердисперсными системами на двухслойный и трехслойный пласты со слоями различной проницаемости.

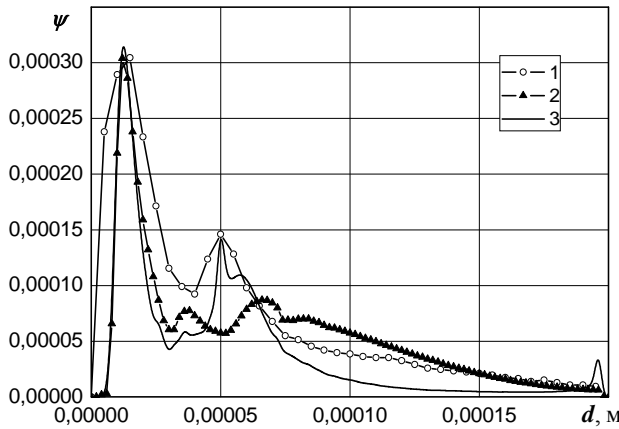


Рис.1. Функции распределения частиц по размерам: 1 - экспериментальное распределение частиц по размерам; 2 и 3 - распределения, полученные расчетным путем: 2 - при постоянном ядре, 3 - для ядра, имеющего разрыв.

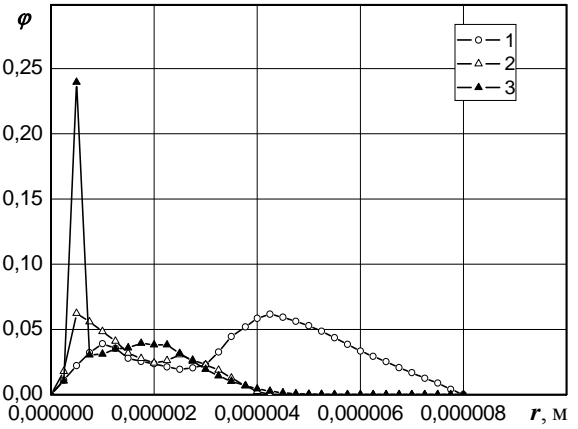


Рис. 2. Функции распределения пор по размерам: 1- начальное распределение; 2, 3 - после обработки ПДС (2 - эксперимент, 3 - модель).

На рисунке 3 приведены графики коэффициента извлечения нефти для двухслойного пласта в случае воздействия на пласт только водой (W), раствором полимера (P) и ПДС (PDS). Отклонение кривых (P) и (PDS) говорит о вовлечении дополнительных объемов нефти из слабопроницаемой части пласта. Однако объём оторочки при полимерном заводнении в 20 раз больше объёма оторочки при

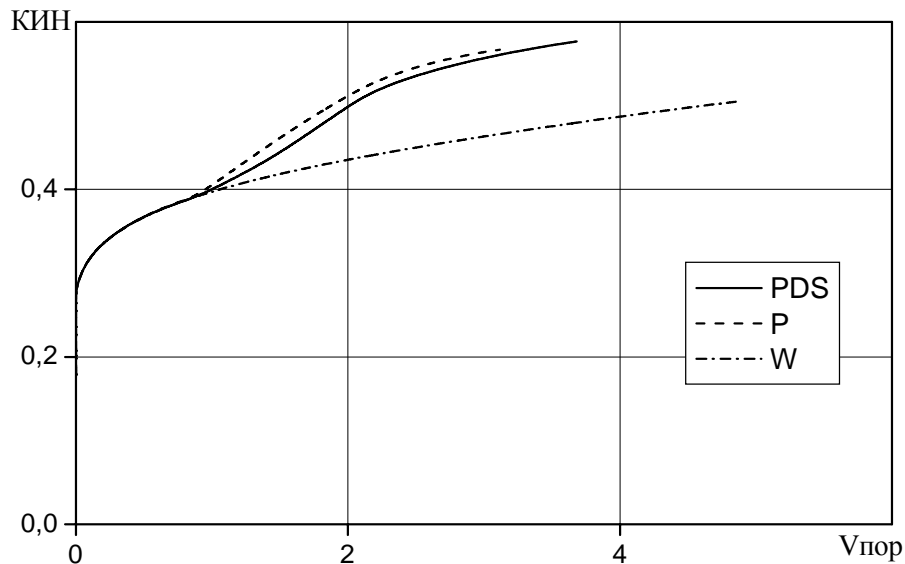


Рис. 3. Коэффициент извлечения нефти в двухслойном пласте.

воздействии на пласт ПДС при одном и том же конечном коэффициенте извлечения нефти. Помимо этого несколько продляется время разработки месторождения в случае применения ПДС по сравнению с полимерным воздействием. Отмечается, что низкопроницаемые барьеры образуются не только в высокопроницаемой части пласта, но и в слабопроницаемой. Поэтому несвоевременная закачка ПДС и неоптимальные

объемы оторочек могут привести к снижению коэффициента извлечения нефти. В связи с этим возрастает роль моделирования такого воздействия. В пункте 3.5 выполнены расчеты воздействия полимердисперсной системой на пласт с зональной неоднородностью по проницаемости на примере элемента пятиточечной системы заводнения. Расчеты показали, что в результате воздействия также блокируется высокопроницаемая промытая часть пласта (рис. 4) и вовлекаются в разработку запасы нефти, оставшиеся невыработанными при обычном заводнении.



Рис. 4. Проницаемость пласта: слева – без воздействия ПДС, справа – после.

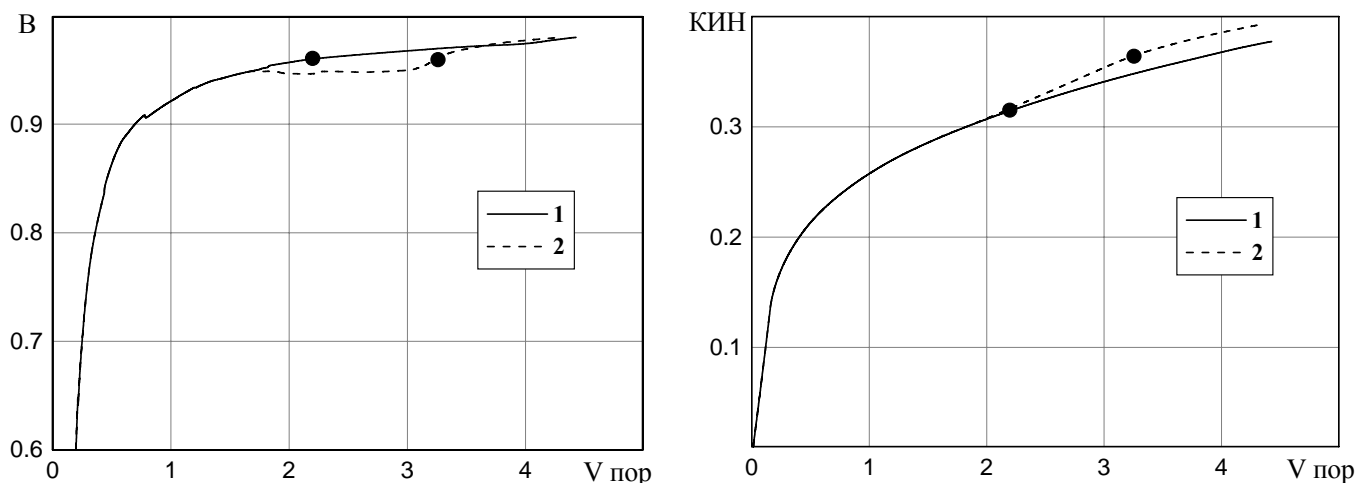


Рис. 5. Обводненность продукции скважины (слева) и коэффициент извлечения нефти в зависимости от объема закачанной воды $V_{пор}$ (в поровых объемах). (1-вода, 2-ПДС). Точкам соответствует обводненность продукции скважины в 96%.

Повышение охвата пласта заводнением и вовлечение в разработку дополнительных запасов нефти сопровождается падением обводненности продукции

скважин (рис. 5 слева), увеличением КИН (рис. 5 справа) и продлением времени “жизни” месторождения.

Основные результаты и выводы, полученные в диссертации

1. Разработана математическая модель воздействия на нефтяной пласт полимердисперсной системой. В модели учитываются структурные изменения пористой среды в процессе фильтрации. Замыкающие соотношения построены на основе идеальной модели пористой среды в виде пучка параллельных капилляров различного радиуса с использованием функций распределения пор по размерам и частиц по объёмам. Определены коэффициенты, входящие в уравнение для функции распределения частиц по объёмам.

2. Для случая плоских течений разработан численный алгоритм решения задачи воздействия на нефтяной пласт полимердисперсной системой. Алгоритм основан на конечно-элементном методе контрольных объёмов.

3. Изучено влияние двух механизмов изменения пористой среды при воздействии полимердисперсными системами. Показано, что основную роль при этом играет блокирование поровых каналов образующимися агрегатами.

4. Выполнено сравнение результатов численного моделирования с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что надлежащий выбор параметров модели позволяет адекватно описать результаты лабораторных экспериментов.

5. Установлено, что одну и ту же нефтеотдачу можно получить при массе полимера в ПДС на порядок меньше, чем при обычном полимерном заводнении. Показано, что применение ПДС позволяет продлить время “жизни” месторождения.

6. Исследовано влияние объемов оторочек примесей и временных характеристик их запуска на нефтеотдачу пласта. Показано, что неправильный подбор параметров может привести к снижению нефтеотдачи.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. *Никифоров А.И., Анохин С.В., Тимошенко И.Е.* О моделировании вытеснения нефти водой из пластов с изменяющейся структурой порового пространства // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 10-летию ИММ КазНЦ РАН, 2001. С.84-99.

2. *Никифоров А.И., Тимошенко И.Е., Газизов А.Ш., Газизов А.А.* Моделирование взаимодействия полимердисперсной смеси при заводнении нефтяных пластов с применением ПДС // Новые идеи поиска, разведки и разработки нефтяных месторождений. Труды научно-практической конференции VII Международной выставки “Нефть, газ – 2000”. Казань, 5-8 сентября 2000 года. Т. II. – Казань: Экоцентр, 2000. С. 461-467.

3. *Анохин С.В., Никифоров А.И., Тимошенко И.Е.* О моделировании некоторых процессов фильтрации, сопровождающихся изменениями структуры порового пространства // VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. – УрО РАН, 2001. С. 49.

4. *Тимошенко И.Е., Никифоров А.И.* О моделировании вытеснения нефти водой с применением ПДС // Сборник статей IX Всероссийской конференции “Структура и динамика молекулярных систем” “Яльчик-2002”, Т. II, С. 169-171.

5. *Никифоров А.И., Анохин С.В., Тимошенко И.Е., Губайдуллин Д.А., Газизов А.Ш.* О моделировании некоторых технологий воздействия на нефтяные пласты // Труды конференции XII Европейского симпозиума “Повышение нефтеотдачи пластов” “Казань-2003”, 8-11 сентября 2003 года.

6. *Никифоров А.И., Тимошенко И.Е.* Об изменении функций распределения пор и частиц по размерам в процессе воздействия на нефтяные пласты полимердисперсными системами // Электронный журнал “Исследовано в России”, 2004.– 115. С. 1232-1240. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/115.pdf>