

На правах рукописи

БАРЫШНИКОВ Николай Александрович

ДВУХФАЗНЫЕ СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки
Институте динамики геосфер Российской Академии наук
(ИДГ РАН), г. Москва

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Турунтаев Сергей Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Каракин Андрей Владимирович

кандидат физико-математических наук
Михайлов Дмитрий Николаевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Российский государственный
университет нефти и газа имени И. М. Губкина»

Защита диссертации состоится «___»_____ 2014 г. в ___ часов на заседании
диссертационного Совета Д 002.050.01 в Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер РАН.

Адрес: г. Москва, Ленинский проспект, д. 38, корп.1, конференц-зал.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института динамики
геосфер Российской академии наук, а так же на сайте института
<http://idg1.chph.ras.ru/>

Автореферат разослан «___»_____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат физико-математических наук _____ **В.А. Рыбаков**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время значительная часть добываемых углеводородов относится к так называемым трудно извлекаемым запасам. Проблемы разработки подобных месторождений связаны с значительными глубинами их залегания, высокими вязкостями добываемых углеводородов, а так же с высокой степенью неоднородности фильтрационных свойств коллекторов. В связи с этим, большое внимание уделяется разработке и внедрению различных методов интенсификации нефтедобычи, главным из которых является метод заводнения. Этот метод заключается в поддержании пластового давления на постоянном уровне посредством нагнетания воды в поровое пространство коллектора, что позволяет поддерживать нефтеотдачу добывающих скважин на необходимом уровне в течение продолжительного времени. Эффективное применение данного метода связано с необходимостью решения сложных задач о взаимном течении несмешивающихся разнвязких жидкостей в неоднородной пористой среде. Для прогнозирования динамики обводнения необходимо учитывать эффекты, связанные с неустойчивостью фронта вытеснения нефти водой. В трещиноватых либо сильно неоднородных коллекторах вытесняющая фаза зачастую прорывается к добывающей скважине, оставляя не вытесненной значительную часть нефти. В однородных коллекторах, содержащих нефть повышенной вязкости, явления прорыва вытесняющей фазы к добывающей скважине происходят вследствие неустойчивости границы раздела жидкостей с различной подвижностью. Это также приводит к тому, что за фронтом заводнения остаются значительные участки, содержащие малоподвижную нефть. Существующие методы прогнозирования динамики обводнения коллекторов основаны главным образом на численных методах решения систем дифференциальных уравнений, использующих в качестве параметров кривые относительных фазовых проницаемостей и капиллярных давлений. Эти кривые должны быть определены экспериментально, на достаточно представительном материале и с достаточной точностью, что не всегда возможно, в связи со значительной фрагментированностью данных геофизических исследований нефтяного коллектора. Зачастую кривые относительных фазовых проницаемостей оцениваются косвенным образом, путем решения соответствующих обратных задач. Неравновесный характер вытеснения может приводить к непостоянству кривых фазовых проницаемостей во времени, что также сказывается на точности методов прогнозирования динамики обводнения. Кроме того, выполнение высокоточных вычислений требует значительных вычислительных ресурсов и времени. Всё это

обуславливает практическую важность изучения неустойчивости фронта вытеснения и актуальность задачи построения аналитической модели развития возмущений фронта вытеснения вязкой жидкости в пористой среде при помощи менее вязкой.

Цель работы.

Цель настоящей работы состоит в проведении экспериментальных исследований и построении аналитической модели развития фильтрационной неустойчивости фронта вытеснения разнвязких жидкостей из пористых сред с учётом влияния капиллярных сил.

Основные задачи исследования.

- Проведение серии лабораторных экспериментов по вытеснению жидкостей с соотношением вязкостей от 1 до 100 при различных, фиксированных, перепадах давления.
- Определение критического значения отношения вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей, при котором происходит нарушение устойчивости плоского фронта вытеснения.
- Получение экспериментальных кривых распределения насыщенности вытесняющей фазы в поровом пространстве модельного коллектора.
- Установление влияния капиллярных сил на развитие неустойчивости фронта вытеснения более вязкой жидкости при помощи менее вязкой.
- Разработка аналитической модели двухфазного струйного фильтрационного течения.
- Сопоставление результатов лабораторного моделирования с результатами вычислений по разработанной модели.
- Сопоставление данных эксплуатации реальных нефтедобывающих скважин с результатами, полученными при использовании разработанной аналитической модели двухфазной струйной фильтрации.

Научная новизна:

Предложенный в работе метод измерения водонасыщенности в сочетании с использованием оптически прозрачной модели пористого коллектора позволяет в реальном времени наблюдать процессы, возникающие при вытеснении вязких жидкостей из пористых сред. Благодаря этому были впервые получены экспериментальные данные об изменении насыщенности вытесняющей фазы в течение продолжительного неустойчивого фильтрационного процесса.

Экспериментально изучено развитие неустойчивости фронта вытеснения вязкой жидкости из пористого массива в виде струй вытесняющей, менее вязкой жидкости. В

процессе вытеснения фиксировалось изменение доли объёма порового пространства, занятого струями вытесняющей жидкости с расстоянием от источника. Было впервые обнаружено и описано явление скачкообразного изменения доли суммарного объёма вытесняющих струй в объёме порового пространства массива на переднем крае фронта вытеснения при соотношениях вязкостей жидкостей много меньших 1. Установлено, что при малых соотношениях вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкости величина подобного скачка на фронте не зависит от отношения вязкостей. Показано, что эта величина пропорциональна величине капиллярного давления и обратно пропорциональна скорости движения фронта вытеснения. Появление скачка водонасыщенности на фронте вытеснения хорошо изучено для случая устойчивого вытеснения при соотношении подвижностей жидких фаз близком к 1. Однако при отношении вязкостей жидкостей много меньшем 1 наличие устойчивого фронта вытеснения, состоящего из отдельных струй вытесняющей жидкости, ранее не отмечалось.

В результате выполнения диссертационного исследования предложена аналитическая модель одномерного двухфазного струйного течения, основанная на применении модельного распределения доли суммарного объёма струй вытесняющей жидкости вдоль пористого массива. Эти и другие результаты, полученные в ходе работы, расширяют возможности аналитического моделирования процессов двухфазной фильтрации.

Защищаемые положения:

- Экспериментально исследовано плоско-параллельное неустойчивое струйное вытеснение разновязких жидкостей из пористого тела. Показано, что струи вытесняющей жидкости формируют фронт, причем объёмная доля струй в поровом пространстве на фронте вытеснения пропорциональна величине капиллярного давления и обратно пропорциональна скорости движения фронта вытеснения при любых соотношениях вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкости.
- За фронтом вытеснения в каждый момент времени квадрат потоковой функции средней по сечению пористого массива водонасыщенности растёт линейно с расстоянием от источника.
- На основе экспериментально полученных распределений средней по сечению водонасыщенности вдоль потока предложена аналитическая модель двухфазного струйного фильтрационного течения с учётом влияния капиллярных сил, которая адекватно описывает результаты лабораторных экспериментов.
- При постоянном перепаде давления между источником и стоком время прорыва вытесняющей жидкости к стоку пропорционально отношению суммарного объёма

порового пространства, вовлечённого в фильтрационный процесс, к начальному суммарному расходу жидкостей. Коэффициент пропорциональности определяется отношением вязкостей жидкостей и величиной минимально возможного скачка средней насыщенности на фронте струйного вытеснения.

Практическая значимость.

Практическая значимость работы обусловлена её направленностью на решение актуальных задач нефтедобывающей промышленности. Применение модели двухфазного струйного фильтрационного течения, учитывающей влияние капиллярных сил на границах раздела фаз, позволяет более адекватно описывать явления, возникающие при продвижении фронта вытеснения в нефтегазовом коллекторе в процессе его заводнения. В работе продемонстрировано хорошее соответствие между оценками изменения обводнённости нефтедобывающей скважины со временем, полученными в результате математического моделирования, и данными, полученными измерениями на реальном месторождении.

Достоверность полученных результатов.

Основным подтверждением достоверности научных выводов служит сопоставление полученных теоретических результатов с данными лабораторных и натурных экспериментов. Достоверность уравнений аналитической модели обусловлена строгим выводом её положений из общих законов и уравнений гидродинамики, физически обоснованных гипотезах и упрощениях. Достоверность результатов лабораторного моделирования подтверждается повторяемостью и воспроизводимостью полученных данных в пределах погрешности лабораторных измерений.

Личный вклад автора.

Автор принимал участие в создании и совершенствовании экспериментальной установки. Им был разработан и успешно внедрён метод непрерывного измерения водонасыщенности порового пространства массива, основанный на оптических свойствах модели пористого коллектора, разработано оригинальное программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс регистрации экспериментальных данных. Автором была проведена серия опытов по вытеснению вязкой жидкости из модели пористого коллектора при помощи менее вязкой, обработаны и проанализированы экспериментальные данные. На основании результатов проведённых экспериментов автором предложена аналитическая модель описания двухфазных струйных течений. Автором был проведён анализ данных эксплуатации ряда скважин Приобского нефтяного месторождения. В результате был предложен аналитический метод описания роста обводнённости добывающих скважин со временем.

Апробация работы и публикации.

Результаты работы докладывались на семинарах ИДГ РАН, на российских научных конференциях в Московском Физико-Техническом институте (2004-2013 гг.), на круглом столе МФТИ-Шлюмберже (2008г), в Краснодаре (2013г), а так же на международных научных конференциях в Вене (2011г) и Софии (2013г.). Основные результаты диссертационной работы отражены в 14 публикациях, в том числе в 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Благодарности.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, д.ф.-м.н. С.Б. Турунтаеву, а так же к.ф.-м.н. Г.В. Белякову и д.ф.-м.н. А.Н. Филиппову за поддержку, рекомендации и ценные замечания.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (93 наименований). Объем работы: 129 страниц машинописного текста, в том числе 27 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, приведены результаты, вносимые на защиту, отмечена их научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации работы.

В **главе 1** в **разделах с 1.1 по 1.4** представлен краткий обзор развития методов описания многофазной фильтрации, приведены основные понятия подземной гидродинамики, рассмотрены модели поршневого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды, определены понятия насыщенности, фазовой проницаемости, сформулирован обобщённый закон Дарси. В **разделе 1.5** первой главы рассмотрена одномерная модель двухфазной фильтрации Бакли-Левретта, получены основные выражения, характеризующие продвижение скачка насыщенности. В **разделе 1.6** первой главы определено понятие кривой капиллярного давления, рассмотрена одномерная модель двухфазной фильтрации Рапопорта–Лиса, учитывающая влияние капиллярных сил на границах раздела жидкостей. В **разделе 1.7** дано представление о стабилизированной зоне, получено выражение для распределения насыщенности внутри стабилизированной зоны и выражение для оценки её ширины в зависимости от суммарной скорости фильтрации. В **разделе 1.8** представлена модель двухфазной фильтрации

Баренблатта, учитывающая влияние неравновесности распределения фаз в пористой среде, дана оценка ширины фронта вытеснения при преимущественном влиянии неравновесности. **Раздел 1.9** первой главы посвящён вопросу устойчивости плоского фронта вытеснения вязкой жидкости: сформулирован критерий устойчивости границы раздела разнвязких жидкостей в задаче Саффмана-Тейлора, показано «сглаживающее» влияние сил поверхностного натяжения и определена минимальная длина волны возмущения, при котором плоская граница раздела жидкостей теряет устойчивость. В **разделе 1.10** представлено исследование устойчивости решения Бакли—Левретта, изложены предположения что процесс вытеснения после потери устойчивости может быть описан при помощи уравнений модели Бакли-Левретта с относительными фазовыми проницаемостями, линейно зависящими от соответствующих насыщенностей. Сформулирована постановка задачи настоящего исследования.

Глава 2 посвящена описанию проведённых опытов по вытеснению более вязкой жидкости, заполняющей модельный пористый коллектор, при помощи менее вязкой жидкости, несмешивающейся с первой.

В **разделе 2.1** излагаются подробности постановки серии лабораторных опытов. Приводится описание экспериментальной установки (рис.1), а так же использованных методов и подходов.

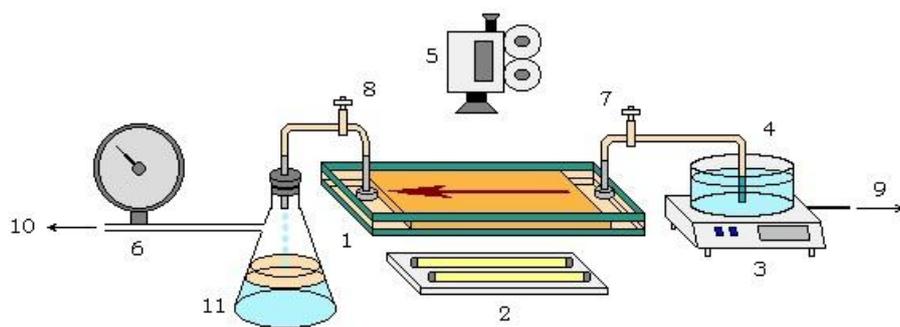


Рис.1. Схема установки. 1 – плоский пористый массив; 2 – лампа подсветки; 3 – весы; 4 – кювета с закачиваемой жидкостью; 5 – фотокамера; 6 – манометр; 7,8 – кран; 9 – компьютер; 10 – выход к насосу; 11 – буферная ёмкость.

В описываемых опытах в качестве модели пористого коллектора использовался лист поролона, зажатый между двумя стеклянными пластинами. Пористость сжатого поролона составляла 0.95, проницаемость составляла 150-300 Дарси. В качестве вытесняемой жидкости использовалось минеральное масло вязкостью $0,9 \text{ г/см}\cdot\text{с}$, в

качестве вытесняющей – водный раствор глицерина различной концентрации, вязкость которого от опыта к опыту варьировалась от 0.01 до 1 $\text{г}/\text{см}\cdot\text{с}$. Вытеснение происходило при постоянном перепаде давления, создаваемого вакуумным насосом в буферной ёмкости, соединённой со стоком пористого массива. В ходе опыта непрерывно фиксировалась суммарная масса закачиваемой жидкости, а так же визуальная картина вытеснения. Из-за сходных коэффициентов преломления света в масле и материале поролона (полиуретан) получаемая модель среды, содержащая вытесняемую жидкость, являлась оптически прозрачной. Это позволяет вести наблюдение за областью проникновения вытесняющей жидкости в пористую среду велось при помощи фотоаппарата (рис.2).

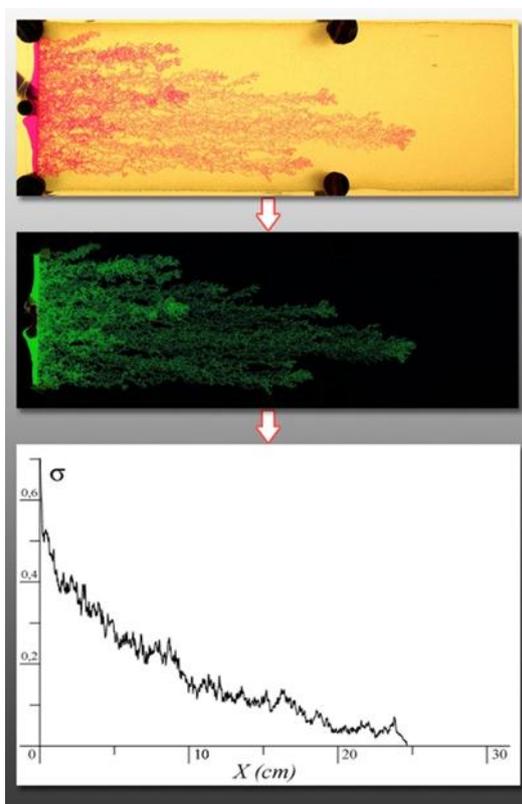


Рис 2. Схема обработки фотоматериалов.

Величина водонасыщенности определённого участка пористого массива соотносилась с яркостью этого участка порового пространства на полученных фотоснимках. В ходе каждого опыта производилась фотосъёмка модели коллектора с частотой один кадр в пять секунд. Для перевода значений яркости $I(x, y)$ участка с координатами (x, y) на фотоснимке в соответствующие величины насыщенности $s(x, y)$ использовалась формула:

$$s(x, y) = a \cdot \frac{I_0(x, y) - I(x, y)}{I_{\max} - I_{\min}},$$

где I_{\max} и I_{\min} яркости соответственно при $s = 1$ и $s = 0$ в каждом опыте определялись в результате калибровки, $I_0(x, y)$ - первоначальная яркость того же участка массива, поправочный коэффициент a определялся из условия равенства интеграла насыщенности $s(x, y)$ по поровому пространству и известного нам в каждый момент времени суммарного объёма вытесняющей жидкости, закачанной в пористый массив. В результате, для каждого снимка была получена кривая распределения доли суммарного объёма струй вытесняющей жидкости в каждом поперечном сечении массива $\sigma(x)$ вдоль направления потока. Формально эта величина совпадает водонасыщенностью, усреднённой по данному сечению.

Раздел 2.2 посвящён описанию результатов основной серии из 27 опытов по вытеснению вязкой жидкости из плоского пористого массива, отличающихся соотношением вязкости вытесняющей и вытесняемой жидкостей. Дается подробное описание процесса неустойчивого вытеснения, отмечается его струйный характер. Проводится сравнение характерных размеров струй вытесняющей жидкости, а так же времён её прорыва к стоку пористого массива, при различных отношениях вязкостей μ_0 . Приводятся соответствующие таблицы.

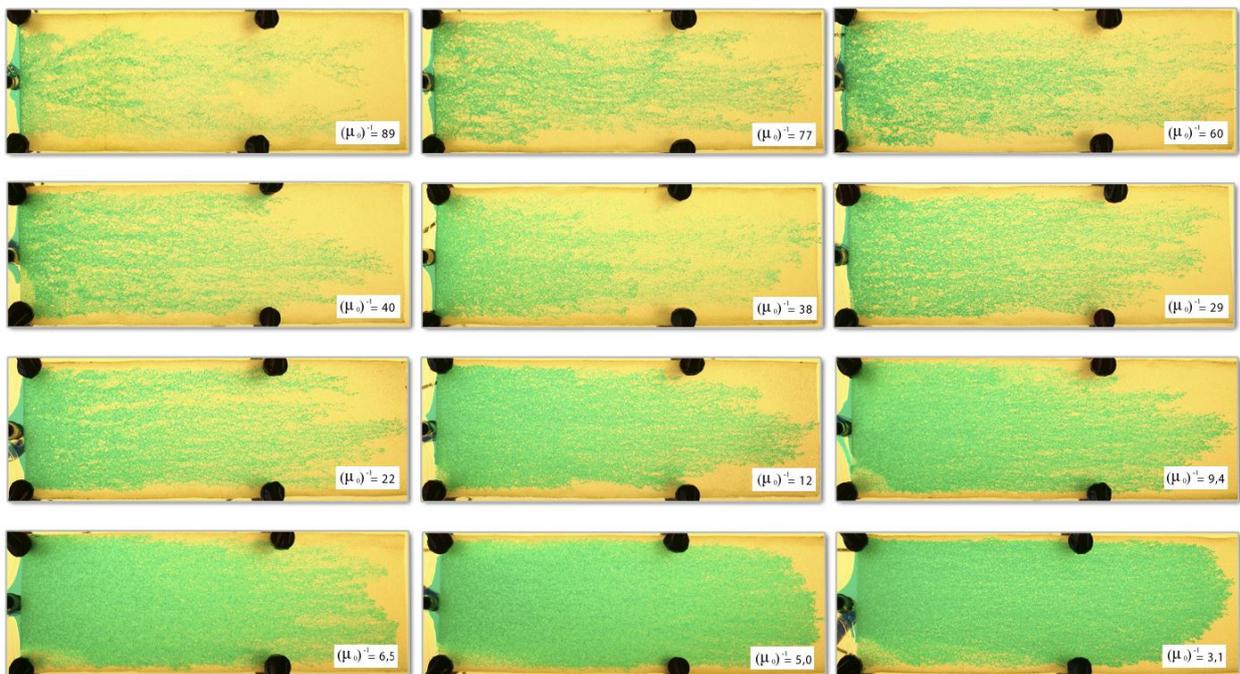


Рис. 3. Распределение струй вытесняющей жидкости в момент её прорыва к стоку для 12-ти различных соотношений вязкостей (значения показаны в правом нижнем

углу каждого кадра). Поток направлен слева направо.

При описании результатов измерения средней по сечению насыщенности $\sigma(x)$ отмечается, что в каждом опыте в различные моменты времени профили насыщенности самоподобны, то есть в процессе вытеснения формы кривых $\sigma(x)$ в различные моменты времени близки при её растяжении или сжатии вдоль оси x . Однако вблизи конца струи вытесняющей жидкости характер убывания средней насыщенности резко меняется. В ходе опытов обнаружено, что в каждый момент времени можно выделить область, где доля объёма порового пространства, занятая струями вытесняющей жидкости возрастает от 0 до величины σ_f , мало меняющейся на протяжении всего процесса вытеснения (рис. 4).

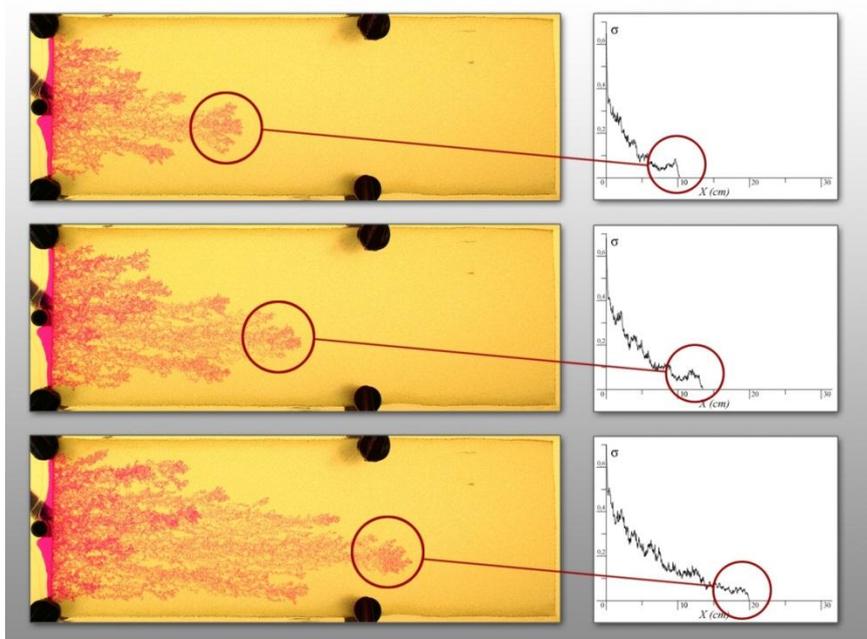


Рис. 4. Продвижение фронта вытеснения в опыте с соотношением вязкости $\mu_0^{-1} = 121$. Разница времени между кадрами составляет 10 секунд. Окружность отмечает область фронта.

Эта область обозначается как струйный фронт вытеснения, координата конца передней струи $x_f(t)$ считается координатой фронта. Установлено, что подобный скачок средней по сечению насыщенности присутствует при любых, сколь угодно малых отношениях вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей, причём от опыта к опыту σ_f мало менялась при отношениях вязкостей много меньше единицы, однако при соотношении примерно 1 к 10 эта величина начинала резко расти (рис. 5).

При соотношении вязкостей близким к 1 величина скачка средней водонасыщенности приближалась к предельной, определяемой остаточной насыщенностью порового пространства вытесняемой жидкостью.

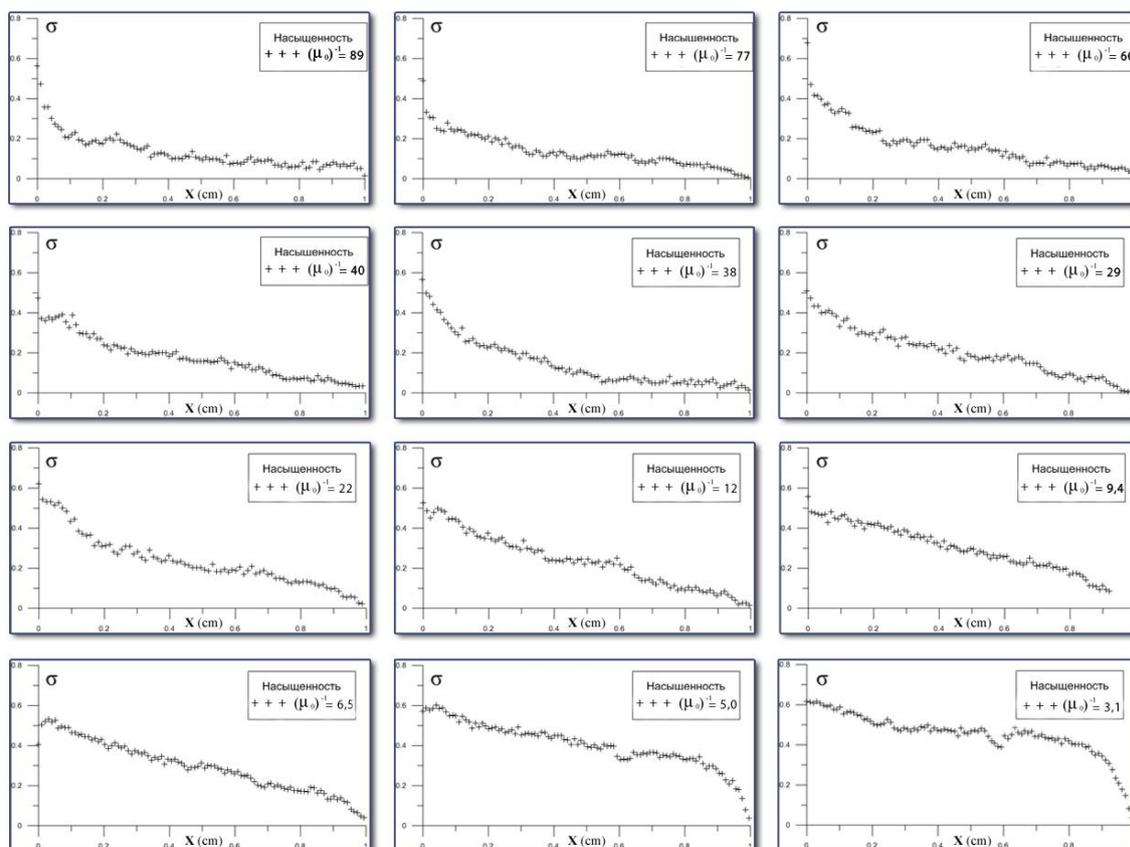


Рис. 5. Распределение $\sigma(x)$ в момент прорыва вытесняющей жидкости к стоку для 12-ти различных соотношений вязкостей.

Глава 3 посвящена выводу основных соотношений математической модели двухфазного струйного течения. Проводится сопоставление модели с экспериментальными результатами, на основе уравнения для струйного двухфазного течения, учитывающего влияние капиллярных сил, делается оценка величины скачка средней насыщенности на струйном фронте вытеснения. Для произвольного достаточно гладкого профиля распределения средней насыщенности выводятся и сравниваются с результатами эксперимента выражения для изменения координаты фронта, суммарного накопленного объёма вытесняющей жидкости и общего расхода жидкостей от времени.

В разделе 3.1 предлагается струйная модель вытеснения. Особенность течений, наблюдаемых в проведённых опытах, заключается в том, что вытесняющая фаза продвигается воль пористого массива в виде отдельных струй по системе каналов, имеющих размеры порядка размера пор. При этом часть пор полностью заполнена

вытесняющей фазой, тогда как другая часть пор остаётся не затронута. Данный факт противоречит классическому представлению, когда величина насыщенности в некоторой области порового пространства определяется соотношением фаз в каждой её поре.

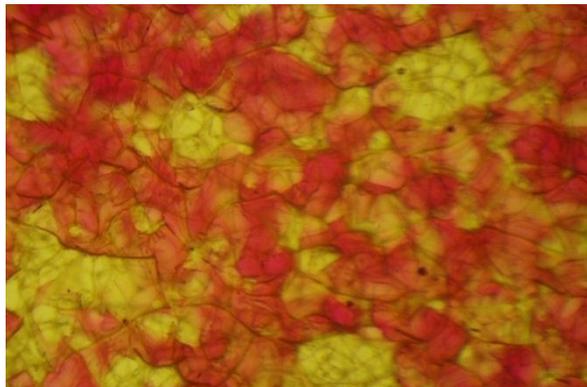


Рис. 6. Увеличенный фрагмент порового пространства за фронтом вытеснения.

В связи с этим для плоско-параллельного течения предлагается ввести понятие относительного сечения фильтрации $\sigma(x)$, определяемого как отношение суммарной площади сечения всех струй вытесняющей жидкости по данной координате к общей площади сечения ω плоского пористого массива. Формально эта величина совпадает с величиной средней насыщенности в данном сечении. В модели предполагается, что:

- Протяженность струй вытесняющей жидкости в направлении потока намного большей их ширины.
- Скорость фильтрации каждой из жидкостей, осредненная по некоторому представительному сечению, направлена вдоль оси x .
- Внутри отдельных пор вытеснение носит поршневой характер.
- Течение каждой из фаз подчиняется закону Дарси.

На основании этих предложений составляется уравнение баланса масс для обеих жидкостей, которое в сочетании с законом Дарси приводит к системе уравнений, описывающей процесс вытеснения. Из этой системы, в свою очередь, выводится уравнение относительно σ :

$$m \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{Q(t)}{\omega} [g(\sigma) + \sigma g'(\sigma)] \frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0,$$

где m - пористость, $Q(t)$ - суммарный объёмный расход жидкостей. Это уравнение по форме совпадает с классическим уравнением Бакли-Левретта относительно усреднённой по сечению плоского пористого массива водонасыщенности, фазовые проницаемости в котором пропорциональны соответствующим насыщенностям. Функция $g(\sigma) = (\sigma(1 - \mu_0) + \mu_0)^{-1}$ выступает в качестве аналога потоковой функции, используемой

в модели Бакли-Лeverетта, $\mu_0 = \mu_1 / \mu_2$ - отношение вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей. В результате решения этого уравнения совместно с уравнением характеристик выводится ряд теоретических соотношений, в том числе закон изменения координаты линии постоянной площади сечения фильтрации со временем, а так же закон распределения величины фильтрационного сечения от расстояния вдоль пористого массива. Из полученных соотношений делается два вывода:

- в каждый момент времени безразмерная координата фронта x_f вытеснения пропорциональна безразмерному суммарному объёму закачанных в массив жидкостей $V(t)$ или, что то же самое, суммарной добытой из массива жидкости:

$$\frac{x_f(t)}{L} = \frac{V(t)}{V(T)},$$

где L - общая длина массива, $V(T)$ - суммарный накопленный объём жидкостей в момент её прорыва к стоку.

- для двух произвольных точек $\sigma_1 = \sigma(x_1, t)$ и $\sigma_2 = \sigma(x_2, t)$ на кривой $\sigma(x, t)$, при условии что $\mu_0^2 x_f(t) \leq x_{1,2} < x_f(t)$ в каждый момент времени выполняется условие:

$$\frac{x_1}{x_2} = \left(\frac{g(\sigma_1)}{g(\sigma_2)} \right)^2$$

В разделе 3.2 проводится сопоставление значений средней по сечению водонасыщенности, измеренной в опытах, с результатами расчетов по струйной модели. Приводятся графики зависимостей функции $g^2(\sigma)$ и σ от безразмерного расстояния x/x_f в момент прорыва первой струи вытесняющей жидкости к стоку (Рис. 7,8).

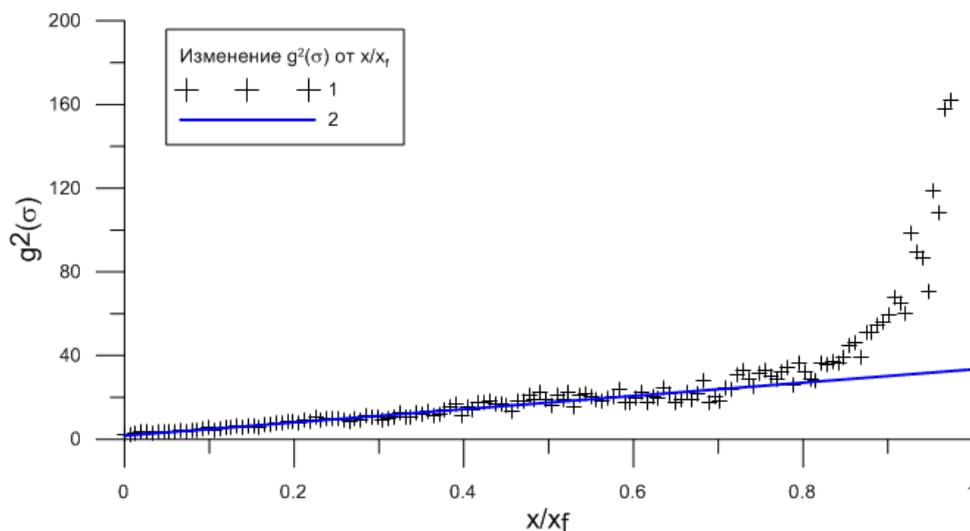


Рис. 7. График зависимости $g^2(\sigma)$ от безразмерного расстояния в момент прорыва первой струи вытесняющей жидкости к стоку в опыте с $\mu_0^{-1} = 22$.

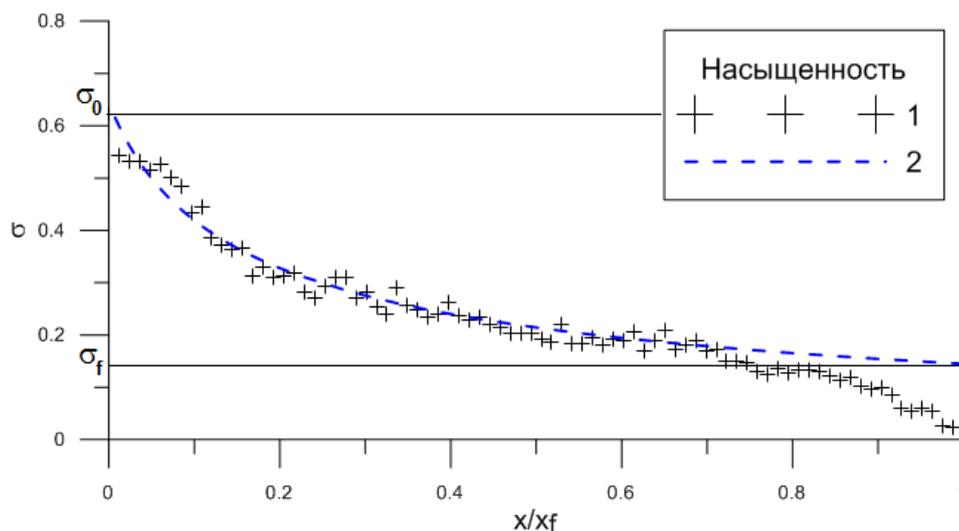


Рис. 8. График зависимости $\sigma(x/x_f)$ в момент прорыва вытесняющей жидкости к стоку в опыте с $\mu_0^{-1} = 22$. 1 - экспериментальная зависимость, 2 - модельная зависимость.

Экспериментальная кривая на графике зависимости $\sigma(x/x_f)$ приближена модельной кривой, определяемой из условия:

$$g^2(\sigma) = \frac{x}{x_f} \left(g^2(\sigma_f) - g^2(\sigma_0) \right) + g^2(\sigma_0),$$

где x_f - текущая координата струйного фронта вытеснения, σ_f - усреднённая по сечению масса насыщенность на фронте вытеснения, σ_0 - насыщенность в точке $x=0$. Сопоставление экспериментальной и теоретической кривых показывает, что условие пропорциональности $g^2(\sigma)$ и расстояния от начала пористого массива выполняется на большей части потока, однако вблизи фронта вытеснения это условие нарушается. Результаты аналогичного анализа приводятся в виде таблицы, в которой отражены величины σ_f для всех проведённых опытов с различными соотношениями вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей.

Раздел 3.3 посвящён факторам, определяющим форму кривой $\sigma(x/x_f)$ в некоторой области вблизи струйного фронта вытеснения. Отмечается, что внутри этой области участки с различной средней насыщенностью движутся с одинаковой скоростью, пропорциональной общему расходу жидкостей через пористый массив. Из этого делается

предположение, что закон изменения средней насыщенности в этой области определяется кривизной начального фронта вытеснения, сохраняющейся в процессе вытеснения при продвижении вдоль направления потока. Особенность конструкции модели пористого коллектора заключалась в том, что между передним краем пористого массива и источником имелся зазор. Вытесняющая жидкость, поступая в этот зазор, растекалась по всей ширине переднего края пористого массива, формируя начальный фронт вытеснения (рис. 9).

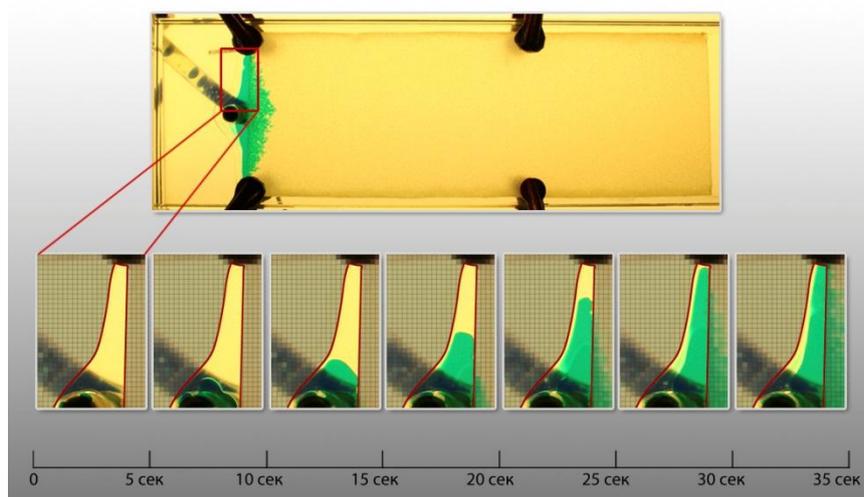


Рис. 9.

Формирование начального фронта вытеснения в зазоре перед пористым массивом в опыте с $\mu_0^{-1} = 5$.

Форма этого зазора делалась такой, что бы путем максимального сокращения времени растекания вытесняющей жидкости создать плоский начальный фронт вытеснения; тем не менее, начальный фронт вытеснения в каждом опыте был отличен от плоского. Результаты сопоставления экспериментальных кривых средней по сечению насыщенности для опытов с различным соотношением вязкостей приводятся в виде графиков (рис. 10).

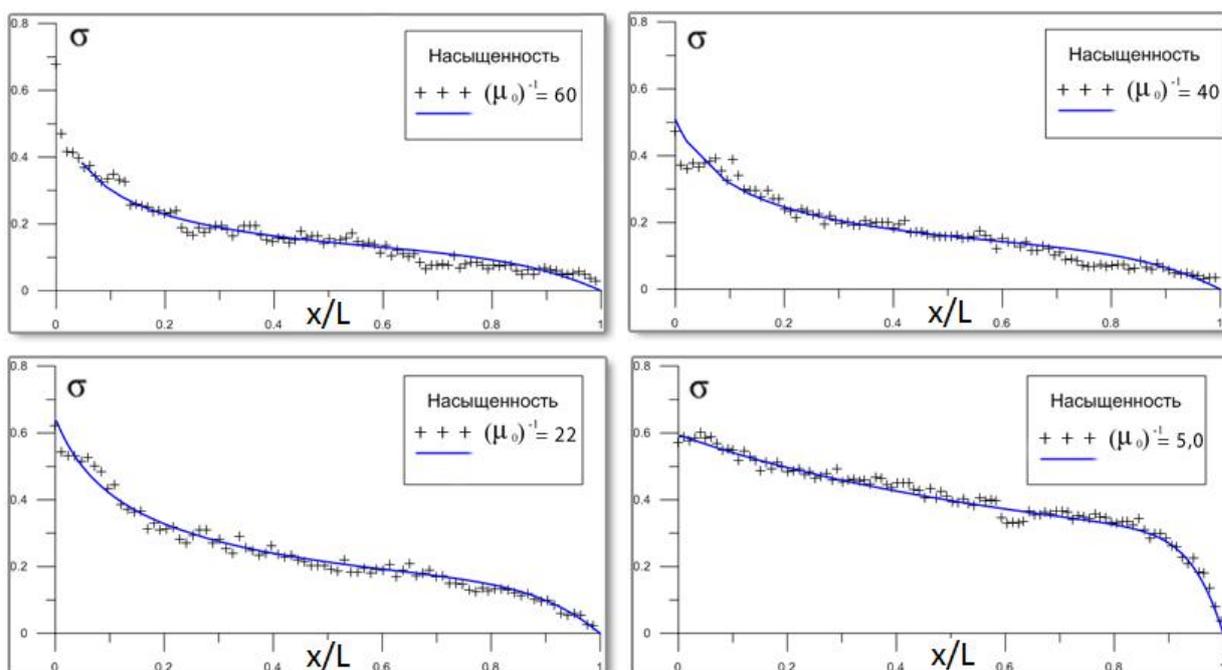


Рис. 10. Распределение насыщенности $\sigma(x/x_f)$ вдоль пористого массива в момент прорыва вытесняющей жидкости к стоку для четырёх различных опытов $\mu_0^{-1} = 60, 40, 22$ и 5 . Сплошными линиями показаны модельные зависимости.

Раздел 3.4 посвящён обсуждению причин существования скачка средней насыщенности на фронте вытеснения. Его возникновение связывается с влиянием сил поверхностного натяжения, действующих на границах раздела фаз. Уравнение, описывающее распределение относительного сечения фильтрации σ в предположениях струйной модели и учитывающее разность давления различных фаз P_c записывается в виде:

$$m \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{Q}{\omega} [g(\sigma) + \sigma g'(\sigma)] \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\sigma(1-\sigma) g(\sigma) \frac{k}{\mu_2} \frac{\partial P_c}{\partial x} \right] = 0$$

В проведённых опытах было установлено, что вытесняющая фаза внутри струи полностью занимала одни поры и оставляла незатронутыми другие. В этом случае величина капиллярного скачка давления должна была быть постоянна и не зависеть от величины относительной площади фильтрации σ . Однако из вида данного уравнения следует, что постоянная разность давлений фаз приводит к тому же уравнению, что и без учёта капиллярных сил, и не может влиять на форму макроскопического течения. Это приводит к необходимости предположить, что разность давления фаз зависит от локального значения относительной площади сечения фильтрационного потока σ . Подобная возможность обосновывается тем, что скорости фильтрации, используемые при составлении уравнений, представляют собой величины, усреднённые по сечению струи вытесняющей жидкости. Реально же область фронта вытеснения представляет собой совокупность множества отдельных струй, с характерным размером порядка средней величины поры. Делается предположение, что силы поверхностного натяжения оказывают максимальное влияние на макроскопическое течение в области быстрого роста относительного фильтрационного течения, то есть там, где появляется большее число новых микроканалов, по которым перемещается вытесняющая фаза. В предположении, что в состоянии равновесия перепад давления на границе раздела фаз равен 0, то есть поверхность пор массива обладает нейтральной смачиваемостью, а так же с учетом конечности времени установления капиллярного равновесия фаз, выводится выражение для среднего по сечению струи перепада капиллярного давления:

$$\bar{P}_c(x) = \frac{\alpha \sqrt{\frac{m}{k}}}{1 + \sigma \cdot \left(\left| \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right| \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \right)^{-1}}$$

При таких предположениях величина капиллярного давления увеличивается с ростом скорости роста относительного сечения, стремясь в пределе к величине $P_c = \alpha \sqrt{m/k}$, где α - коэффициент поверхностного натяжения. При $\left| \frac{\partial \sigma}{\partial x} \right|$ стремящейся к 0, что соответствует постоянной ширине сечения фильтрации, величина среднего скачка капиллярного давления будет стремиться к 0. Это даёт возможность записать условие на минимально возможную «ширину» струи на фронте вытеснения жидкостей. Для этого рассматривается модель одиночной струи вытесняющей жидкости постоянного сечения, продвигающаяся в направлении потока с постоянной скоростью. С использованием исходного уравнения двухфазной фильтрации выводится уравнение относительно величины среднего по сечению капиллярного давления:

$$\frac{dP_c}{d\chi} = \frac{\mu_2}{k} m w_f (1 - \mu_0) \sigma_f \left[\frac{1 - \frac{\sigma}{\sigma_f}}{1 - \sigma} \right],$$

где $\chi = x - w_f t$, $w_f = g(\sigma_f) Q / \omega m$ - скорость движения струи.

Используя полученное уравнение, в предположении малости величины скачка средней насыщенности $\sigma_f \ll 1$, а так же малости глубины фронта вытеснения l по сравнению с общей протяжённостью струй, можно сделать оценку:

$$\sigma_f \approx \frac{k}{\mu_2} \frac{P_c}{l} \frac{1}{m w_f} \frac{1}{1 - \mu_0}$$

Из данного выражения следует, что величина фронтальной средней насыщенности пропорциональна величине капиллярного давления и обратно пропорциональна скорости движения струйного фронта вытеснения. Кроме того, как и было установлено в опытах, при $\mu_0 \ll 1$ величина σ_f мало зависит от отношения вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей. Результаты сравнения величин экспериментальной и оценочной величин фронтальной средней насыщенности σ_f представлены на графике (рис 11).

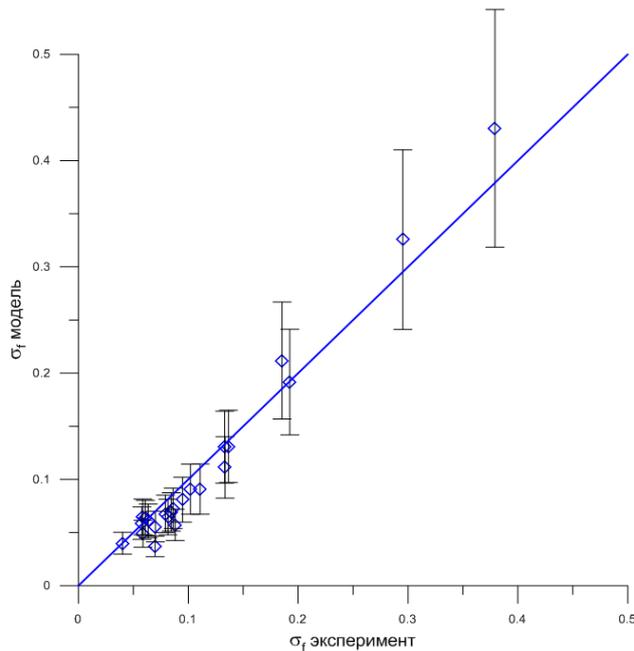


Рис. 11.

Сравнение экспериментальной и теоретической величин фронтальной средней насыщенности для различных соотношений вязкостей.

В разделе 3.5 с использованием модели струйного вытеснения выводится ряд соотношений, характеризующих фильтрационный поток. При выводе этих выражений предполагается, что:

- Перепад давления ΔP на концах массива постоянен.
- Величина фронтальной средней насыщенности σ_f неизменна на протяжении всего процесса вытеснения.
- Скорость движения струйного фронта вытеснения равна скорости вытесняющей жидкости за фронтом вытеснения.

Пользуясь модельным распределением фильтрационного сечения вида

$$\sigma(x,t) = \begin{cases} f\left(\frac{x}{x_f(t)}\right) & , \text{при } 0 \leq x \leq x_f \\ 0 & , \text{при } x_f \leq x \leq L \end{cases}$$

где $f(x/x_f)$ - произвольная гладкая, монотонно убывающая функция, получаем зависимость суммарного расхода жидкостей от координаты фронта вытеснения:

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = \left(\frac{x_f(t)}{L} (\gamma \mu_0 - 1) + 1 \right)^{-1}$$

где введено обозначение $\gamma = \int_0^1 (f(y)(1 - \mu_0) + \mu_0)^{-1} dy$, Q_0 - начальный объёмный расход.

Кроме того, получены выражения для зависимости суммарного расхода жидкостей от времени:

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = \left(1 + 2(\gamma\mu_0 - 1) \frac{Q_0}{V(T)} \cdot t \right)^{\frac{1}{2}},$$

а так же для зависимости координаты фронта $x_f(t)$ и суммарного накопленного объёма $V(t)$ жидкостей от времени:

$$\frac{x_f(t)}{L} = \frac{V(t)}{V(T)} = \frac{-1 + \left(1 + 2(\gamma\mu_0 - 1) \frac{Q_0}{V(T)} \cdot t \right)^{\frac{1}{2}}}{\gamma\mu_0 - 1}.$$

Из последней зависимости следует выражение для общего времени, за которое струя вытесняющей жидкости проходит расстояние от устья пористого массива к стоку:

$$T = \frac{\gamma\mu_0 + 1}{2} \frac{V(T)}{Q_0}$$

Параметр γ может быть выражен через время прорыва вытесняющей жидкости к стоку T и суммарный накопленный объём жидкости в момент прорыва $V(T)$. Тогда все остальные выражения могут быть переписаны в безразмерной форме таким образом, чтобы в качестве параметров содержать только эти две величины:

$$\frac{x_f(t)}{L} = \frac{V(t)}{V(T)} = \frac{-1 + \left(1 + 4 \left(\frac{T \cdot Q_0}{V(T)} - 1 \right) \frac{Q_0}{V(T)} \cdot t \right)^{\frac{1}{2}}}{2 \left(\frac{T \cdot Q_0}{V(T)} - 1 \right)}$$

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = \left(1 + 4 \left(\frac{T \cdot Q_0}{V(T)} - 1 \right) \frac{Q_0}{V(T)} \cdot t \right)^{\frac{1}{2}}$$

Сравнение экспериментальных зависимостей координаты струйного фронта и суммарного расхода жидкостей от времени для различных соотношений вязкостей приводятся в виде графиков (рис. 12). Сплошными линиями показаны зависимости, вычисленные с использованием экспериментальных значений времени прорыва и накопленного объёма жидкостей в момент прорыва.

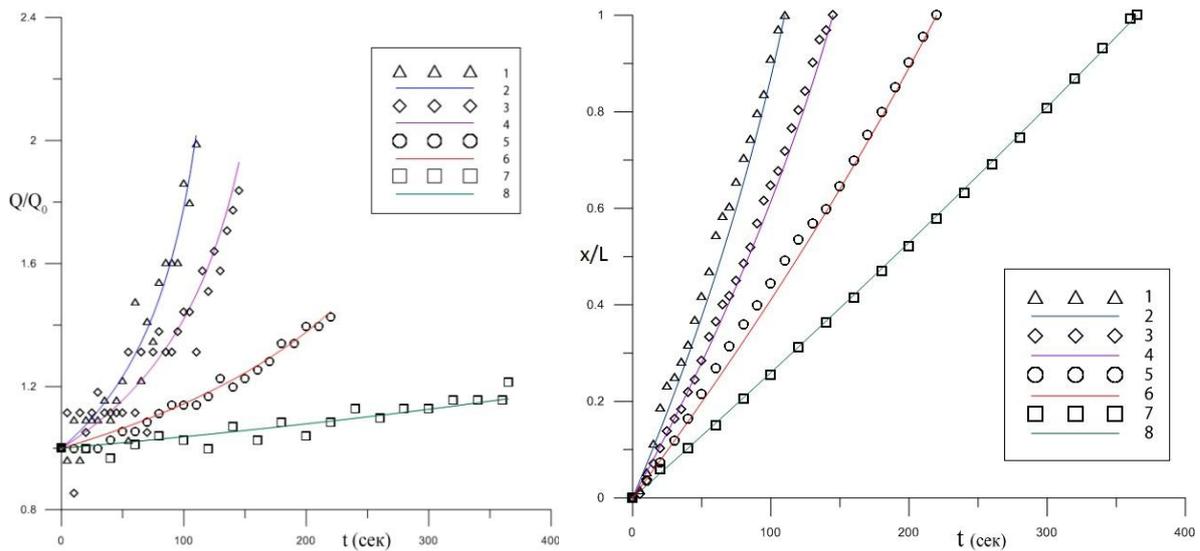


Рис.12. Изменение расхода жидкостей и координаты фронта со временем в опытах с различным соотношением вязкостей: 1,2 - $(\mu_0)^{-1} = 40$; 3,4 - $(\mu_0)^{-1} = 22$; 5,6 - $(\mu_0)^{-1} = 6,5$; 7,8 - $(\mu_0)^{-1} = 3,1$. Сплошными линиями показаны модельные зависимости.

Для завершения описания динамики продвижения струйного фронта вытеснения остаётся получить выражения для параметров T и $V(T)$. Для этого рассматривается модельное распределение средней насыщенности вытесняющей жидкости вдоль пористого массива в следующей форме:

$$\sigma(x,t) = \begin{cases} 1 & , \text{ при } 0 \leq x < x_f \frac{1}{g^2(\sigma_f)} \\ \left(\frac{1}{g(\sigma_f)} \left(\frac{x}{x_f} \right)^{-\frac{1}{2}} - \mu_0 \right) \frac{1}{1 - \mu_0} & , \text{ при } x_f \frac{1}{g^2(\sigma_f)} \leq x < x_f \\ 0 & , \text{ при } x_f \leq x \leq L \end{cases}$$

После этого выводятся выражения для модельного параметра γ :

$$\gamma = \frac{2}{3} g(\sigma_f) + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{g^2(\sigma_f)},$$

для времени прорыва T :

$$T = \frac{\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{g^3(\sigma_f)} \right) \mu_0 + \frac{1}{g(\sigma_f)} \frac{V_p}{Q_0}}{2}$$

и для накопленного объёма жидкостей в момент прорыва $V(T)$:

$$V(T) = \frac{1}{g(\sigma_f)} V_p,$$

где $V_p = m\omega L$ - суммарный объём порового пространства массива.

Сравнение величин суммарного накопленного объёма жидкостей и времени прорыва для всех опытов отражается на графиках (рис. 13), где по осям абсцисс отложены экспериментальные величины, по осям ординат – вычисленные по модели.

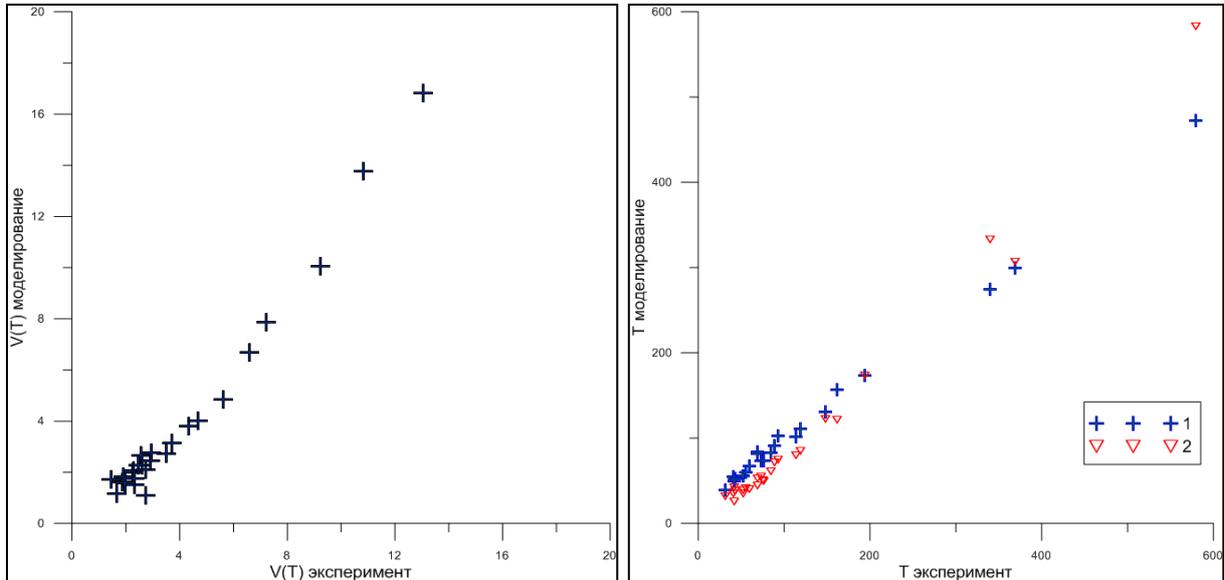


Рис.13. Сравнение экспериментальных и модельных величин суммарного накопленного объёма жидкостей (слева) и времени прорыва (справа).

На графике сравнения времён кривая 1 получена с использованием экспериментального накопленного объёма на момент прорыва, кривая 2 вычислена через суммарный объём порового пространства.

Глава 4 В четвёртой главе рассмотрена динамика изменения обводнённости стока пористого массива. С использованием струйной модели вытеснения получена система уравнений, задающая закон изменения обводнённости со временем при постоянном перепаде давления. Результаты математического моделирования сравниваются с данными эксплуатации реальной нефтедобывающей скважины.

В разделе 4.1 с использованием струйной модели вытеснения и использованного ранее модельного распределения средней насыщенности за струйным фронтом вытеснения выводится система уравнений, задающая закон изменения обводнённости со временем при постоянном перепаде давления. Под обводнёностью понимается отношение объёмного расхода вытесняющей жидкости $q_1(t)$ в общем объёме добываемой жидкости $Q(t)$ после её прорыва к стоку. Полученная система состоит из уравнения,

определяющего зависимость обводнённости $\frac{q_1}{Q}$ от величины средней водонасыщенности

σ_L стока пористого массива:

$$\frac{q_1}{Q} = \frac{1 - \mu_0 g(\sigma_L)}{1 - \mu_0},$$

и уравнения, в неявном виде определяющего изменение средней насыщенности стока от времени:

$$t = \mu_0 g(\sigma_f) \frac{V_p}{Q_0} \left(\frac{1}{6} \left(\frac{1}{g^4(\sigma_L)} - \frac{1}{g^4(\sigma_f)} \right) + \frac{4}{3} \left(\frac{1}{g(\sigma_L)} - \frac{1}{g(\sigma_f)} \right) \right)$$

Момент времени $t = 0$ здесь соответствует моменту прорыва вытесняющей жидкости к стоку. Из последнего уравнения вычисляется теоретическое время полного вытеснения:

$$T_1 = \frac{3}{2} \mu_0 g(\sigma_f) \frac{V_p}{Q_0}$$

В разделе 4.2 делается предположение, что аналогичные уравнения для обводнённости могут быть записаны и для случая потока между точечным источником и стоком, что соответствовало бы упрощённой системе нагнетательной и добывающей скважин при разработке нефтегазового месторождения. Приводится анализ данных эксплуатации 28 скважин Приобского месторождения, результаты представлены в виде графиков, на которых данные эксплуатации приближены кривой, вычисленной из полученной ранее системы уравнений. Коэффициент $C = \mu_0 g(\sigma_f) \frac{V_p}{Q_0}$, использованный при получении модельных кривых, был вычислен по разности времён между моментом прорыва вытесняющей жидкости и моментом, когда степень обводнённости достигла 85 процентов. По данным о начальном расходе жидкостей и величине полученного ранее коэффициента вычисляется суммарный объём порового пространства коллектора. После чего, исходя из имеющихся данных о пористости и мощности пласта, для каждой скважины получен радиус условного контура питания. Этот радиус в среднем совпадает с радиусом контура питания 250 метров, приведённым в данных эксплуатации для всех скважин. Данные анализа представлены в виде таблицы.

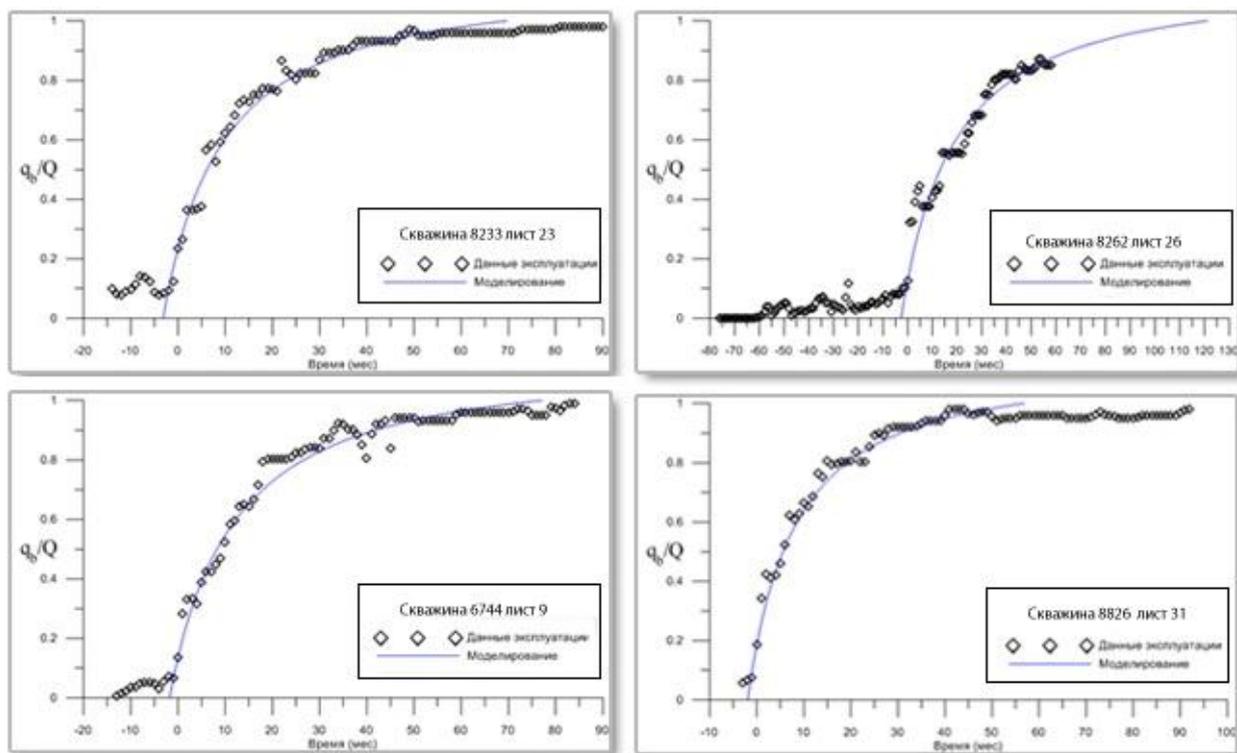


Рис. 14. Изменение обводнённости для четырёх добывающих скважин в процессе эксплуатации после прорыва фронта обводнения. Сплошной линией показана модельная зависимость.

В заключении приведены основные выводы по всей диссертационной работе:

Основные результаты работы

- Разработан оптический метод определения водонасыщенности плоского пористого массива, основанный на сопоставлении светопоглощения его участков с соотношением объемов жидкостей на этих участках.
- Проведена серия экспериментов по вытеснению вязкой жидкости из плоского пористого массива при соотношениях вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей от 1 до 100.
- Получены экспериментальные данные о распределении доли объёма порового пространства, занятого струями вытесняющей жидкости, вдоль пористого массива.
- Установлено что при любых соотношениях вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкости при плоско-параллельном вытеснении на переднем крае струйного фронта вытеснения существует скачок средней по сечению пористого массива насыщенности вытесняющей жидкости.

- Показано, что величина скачка средней насыщенности вытесняющей жидкости пропорциональна величине капиллярного давления и обратно пропорциональна скорости движения струйного фронта вытеснения.
- Установлено, что величина скачка средней насыщенности на струйном фронте вытеснения не зависит от соотношения вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкости, если это соотношение много меньше 1.
- Найдено, что за фронтом вытеснения в каждый момент времени квадрат потоковой функции средней по сечению водонасыщенности σ растёт линейно с расстоянием x от источника: $x \sim (\sigma(x)(1 - \mu_0) + \mu_0)^{-2}$.
- Показано, что при плоско-параллельном двухфазном течении распределение средней по сечению насыщенности вытесняющей фазы вблизи струйного фронта вытеснения определяется его начальной кривизной.
- Для произвольного распределения средней насыщенности вытесняющей фазы при плоско-параллельном вытеснении получены законы изменения во времени суммарного объёмного расхода, суммарного накопленного объёма, а так же координаты фронта вытеснения.
- Показано, что суммарный объёмный расход жидкостей, а так же координата фронта вытеснения, могут быть выражены в безразмерной форме с использованием в качестве параметров только величины суммарного накопленного объёма жидкостей в момент прорыва вытесняющей жидкости к стоку и времени прорыва.
- Получены выражения для величины суммарного накопленного объёма жидкостей в момент прорыва вытесняющей жидкости к стоку и для времени прорыва. Показано хорошее совпадение оценок по предложенным выражениям с результатами эксперимента.
- Получена система уравнений, описывающая динамику обводнённости стока пористого массива для случая плоско-параллельного течения.
- Проанализированы данные эксплуатации ряда добывающих скважин Приобского нефтяного месторождения. Показано, что данные об изменении обводнённости добывающих скважин со временем могут быть описаны кривыми, полученными на основе предложенной струйной модели вытеснения.
- На основе анализа динамики изменения обводнённости для каждой добывающей скважины вычислен радиус условного контура питания. Показано его соответствие натурным данным.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. **Барышников Н.А.**, Беляков Г.В., Турунтаев С.Б., Филиппов А.Н. Лабораторное моделирование двухфазных струйных течений.// Труды РГУ имени И.М.Губкина, – 2013 г., – №3(272), – с.15-29.
2. **Барышников Н.А.**, Беляков Г.В., Турунтаев С.Б. Экспериментальное исследование вытеснения вязких жидкостей из пористых сред.// Изв. РАН. МЖГ. – 2005 г. № 1. – с.115-122.
3. **Барышников Н.А.**, Беляков Г.В., Таирова А.А., Турунтаев С.Б. Осаждение частиц в каналах с проницаемыми стенками.// Изв. РАН. МЖГ. – 2010 г., №4, – с.107 – 117.
4. **Барышников Н.А.**, Турунтаев С.Б., Беляков Г.В., Таирова А.А., Виноградов Е.А. Экспериментальное изучение неустойчивых двухфазных течений// Сборник научных трудов ИДГ РАН "Динамические процессы в геосферах", Москва, «Геос», – 2013 г., Вып.4, – с.164-174.
5. **Барышников Н.А.**, Беляков Г.В., Зенченко Е.В., Турунтаев С.Б. Экспериментальное исследование вытеснения вязких жидкостей из пористых сред.// Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках земли, – Москва, – 2003., – с. 47 – 51.
6. **Барышников Н.А.**, Беляков Г.В., Таирова А.А., Турунтаев С.Б. Фильтрация двухфазного флюида в трещине с проницаемыми стенками.// Локальные и глобальные последствия воздействий на геосферы. – Москва, "Геос", – 2008 ., – с. 37 – 46.
7. **Барышников Н.А.**, Беляков Г.В., Таирова А.А., Турунтаев С.Б. Экспериментальное изучение неустойчивости границы раздела сред с различной проницаемостью.// Проблемы взаимодействующих геосфер. – Москва, "Геос", – 2009 ., – с.173 – 177.
8. **Барышников Н.А.** Экспериментальное исследование вытеснения вязких жидкостей из пористых сред.// Материалы XLVII научной конференции МФТИ, – 2004., – с. 93 – 95.
9. **Барышников Н.А.** Течение разновязкостных жидкостей в пористой среде.// Материалы 48-й научной конференции МФТИ, – 2005 г., – с.34 – 36.
10. Беляков Г.В., **Барышников Н.А.**, Турунтаев С.Б. О возможности постановки эксперимента по изучению электрокинетического эффекта на ячейке Хеле-Шоу.//

Круглый стол "МФТИ-Шлюмберже": физические модели в современной нефте- и газодобыче. – Москва. – 2008 г., – с. 5 – 4.

11. Таирова А.А., **Барышников Н.А.**, Беляков Г.В., Турунтаев С.Б. Неустойчивость границы раздела сред с различной проницаемостью.// Труды 52-й научной конференции МФТИ. Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. – Москва, МФТИ, – 2009 г., – с. 57 – 58.
12. Tairova A.A., Belyakov G. V., **Baryshnikov N.A.**, and Turuntaev S.B... Filtration and sedimentation in the channel with permeable walls.// EGU2011. Geophysical Research. Abstracts., Vol. 13, – Vena. – 2011 –p.751.
13. Gabova A.V., Belyakov G.V., **Baryshnikov N.A.**, Tairova A.A., Filippov A.N. / Theoretical and Experimental Study of Aqueous Suspension Filtration through Model of a Porous Medium.// Int. Conf. Ion transport in organic and inorganic membranes. Krasnodar, KSU, 02-07 June, 2013. Conference Proceeding, – p. 79-81.
14. Filippov A.N., Belyakov G.V., **Baryshnikov N.A.**, Tairova A.A./ Filtration of Aqueous Suspension through Porous Medium.// 27th ECIS Conference, 1 - 6 September 2013, Sofia, Bulgaria, Disc of Abstracts.