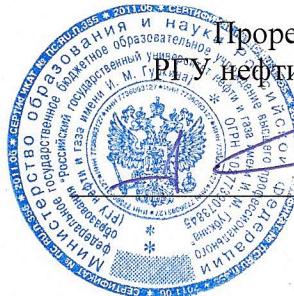


«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
Государственный технический университет нефти и газа им. И.М. Губкина

д.т.н., проф. Мурадов А.В.

«14» мая 2014 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу БАРЫШНИКОВА Николая Александровича  
**«ДВУХФАЗНЫЕ СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ»**,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности

25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»

Известно, что значительная часть добываемых углеводородов относится к так называемым трудно извлекаемым запасам. Кроме того, после выработки скважины от трети до половины нефти в любом месторождении остается недобытой. Проблемы разработки таких месторождений в основном связаны со значительными глубинами их залегания, большими вязкостями добываемых углеводородов, а также с высокой степенью неоднородности фильтрационных характеристик коллекторов. В этой связи одним из главных методов интенсификации нефтедобычи является метод заводнения месторождения. Его эффективное применение связано с необходимостью решения сложных краевых задач о совместном течении несмешивающихся жидкостей разной вязкости в неоднородно-пористой среде. Для прогнозирования развития процесса обводнения необходимо учитывать эффекты, связанные с неустойчивостью фронта вытеснения нефти водой. Дело в том, что в трещиноватых и сильно неоднородных коллекторах вытесняющая фаза часто прорывается к добывающей скважине, оставляя в итоге не вытесненной значительную часть нефти. Аналогичные явления имеют место из-за неустойчивости межфазной границы раздела вытесняемой и вытесняющей жидкостей в однородных коллекторах, содержащих нефть повышенной вязкости.

Существующие методы прогнозирования динамики обводнения коллекторов основаны в основном на численных расчетах, решении краевых задач для систем дифференциальных уравнений в сложных областях, использующих в качестве параметров кривые относительных фазовых проницаемостей и капиллярных давлений, которые известны приблизительно и фрагментарно и, конечно, не для всех месторождений. Кроме того, выполнение упомянутых вычислений требует значительных вычислительных ресурсов и времени. С этой точки зрения построение аналитической модели развития фронта вытеснения вязкой жидкости в пористой среде при помощи менее вязкой и изучение его неустойчивости, чему посвящена работа Н.А.Барышникова, представляется, безусловно, *актуальной и практически важной задачей*.

Диссертационная работа Н.А.Барышникова состоит из введения, четырех глав, заключения, она изложена на 127 страницах машинописного текста и содержит 27 рисунков, а также список литературы из 93 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, показана научная новизна и практическая значимость, четко определены цель и задачи исследования.

Первая глава, занимающая 50 страниц из 127, посвящена описанию различных моделей фильтрации в пористой среде на основе анализа литературных источников.

Здесь для удобства читателя приведены основные понятия подземной гидродинамики, рассмотрены модели поршневого вытеснения вязкой жидкости из пористой среды, определены понятия насыщенности, фазовой проницаемости, сформулирован обобщённый закон Дарси. Автором рассмотрена одномерная модель двухфазной фильтрации Бакли-Леверетта; одномерная модель двухфазной фильтрации Рапопорта-Лиса, учитывающая влияние капиллярных сил на границах раздела жидкостей; модель двухфазной фильтрации Баренблатта, учитывающая влияние неравновесности распределения фаз в пористой среде; обсуждена проблема устойчивости плоского фронта вытеснения вязкой жидкости: сформулирован критерий устойчивости границы раздела жидкостей разных вязкостей в задаче Саффмана-Тейлора и показано «сглаживающее» влияние сил поверхностного натяжения; определена минимальная длина волны возмущения, при котором плоская граница раздела жидкостей теряет устойчивость; представлено исследование устойчивости решения Бакли—Леверетта; изложены предположения автора о том, что процесс вытеснения после потери устойчивости может быть описан при помощи уравнений модели Бакли-Леверетта с относительными фазовыми проницаемостями, линейно зависящими от соответствующих насыщенностей. Данная глава является, безусловно, важной для понимания проведенного исследования. Здесь же сформулирована постановка основной задачи диссертационного исследования.

**Глава 2** посвящена описанию проведённых диссидентом опытов по вытеснению более вязкой жидкости при помощи менее вязкой жидкости, не смешивающейся с первой, заполняющей пористый коллектор, моделируемый листом сжатого поролона в ячейке типа Хеле-Шоу. Вытеснение более вязкой жидкости происходило в экспериментах при постоянном перепаде давления, создаваемом вакуумным насосом в буферной ёмкости, соединённой со стоком пористого массива. В ходе опыта непрерывно фиксировалась суммарная масса закачиваемой жидкости, а также визуализировалась картина вытеснения. Величина водонасыщенности определённого участка пористого массива на полученных фотоснимках соотносилась с яркостью этого участка порового пространства. **Впервые** было установлено, что скачок средней по сечению насыщенности присутствует при любых, сколь угодно малых отношениях вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей. При соотношении вязкостей близком к единице величина скачка средней водонасыщенности стремилась к предельному значению, определяемому остаточной насыщенностью порового пространства вытесняемой жидкостью.

**В главе 3** приведена формулировка математической модели двухфазного струйного течения. Автором на основе уравнения для струйного двухфазного течения, учитывающего влияние капиллярных сил, осуществлено сопоставление предложенной модели с собственными экспериментальными результатами, дана оценка величины скачка средней насыщенности на струйном фронте вытеснения. Для произвольного 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. Обсуждены причины существования скачка средней насыщенности на фронте вытеснения. Возникновение скачка связывается автором с влиянием сил поверхностного натяжения, действующих на границах раздела фаз. В проведённых опытах **впервые** было установлено, что вытесняющая фаза внутри струи полностью занимает одни поры и оставляет незатронутыми другие, что привело диссидентата к необходимости предположить, что разность давления фаз зависит от локального значения относительной площади сечения фильтрационного потока. Сравнение

результатов экспериментов и теоретических предсказаний показало их хорошее совпадение.

В главе 4 приводится динамика изменения обводнённости стока пористого массива. С использованием предложенной в диссертации струйной модели вытеснения получена система уравнений, задающая закон изменения обводнённости во времени при постоянном перепаде давления. Результаты математического моделирования сравниваются с данными эксплуатации реальных нефтедобывающих скважин и показывают их удовлетворительное согласие. Например, по данным о начальном расходе жидкостей и величине полученного коэффициента был вычислен суммарный объём порового пространства коллектора. После чего, исходя из имеющихся данных о пористости и мощности пласта Приобского месторождения, для каждой из 28 скважин был получен радиус условного контура питания. Этот радиус в среднем совпал с радиусом контура питания, равным 250 метров и приведённым в данных эксплуатации для всех скважин.

Следует особо подчеркнуть, что диссертационная работа Н.А. Барышникова направлена на решение важной научно-практической задачи аналитического прогнозирования динамики обводнения нефтяных коллекторов, а ее результаты могут быть использованы для разработки математических моделей, описывающих перенос двухфазных жидкостей в пористых структурах и методов оценки эффективности вытеснения нефти из коллекторов такими учреждениями как РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, ВНИИГеофизика, ОАО «ВНИИ НП», а также рядом других вузов и организаций нефтяного профиля.

Все научные положения диссертационной работы Н.А. Барышникова обусловлены строгим выводом её положений из общих законов и уравнений гидродинамики, физически обоснованными гипотезами и упрощениями. Достоверность данных лабораторного моделирования подтверждается повторяемостью и воспроизводимостью полученных результатов в пределах погрешности измерений. Основные теоретические и экспериментальные результаты, полученные в работе, показали хорошее согласие с результатами других авторов.

Ведущая организация считает необходимым подчеркнуть, что все основные результаты и рекомендации настоящей диссертации отличаются несомненной новизной, в частности,

- разработан оптический метод определения водонасыщенности плоского пористого массива, основанный на сопоставлении светопоглощения его участков с соотношением объемов жидкостей на этих участках;
- установлено что при любых соотношениях вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкости на переднем крае струйного фронта вытеснения существует скачок средней по сечению пористого массива насыщенности вытесняющей жидкости, величина которого пропорциональна величине капиллярного давления и обратно пропорциональна скорости движения струйного фронта вытеснения;
- на основе анализа динамики изменения обводнённости для добывающих скважин Приобского месторождения вычислен радиус условного контура питания. Показано его соответствие натурным данным.

В целом **научная ценность** полученных соискателем результатов состоит в существенном развитии фундаментальных научных знаний в области лабораторного и математического моделирования процессов массопереноса двухфазных жидкостей в пористых структурах с учетом неустойчивости границы раздела фаз с течением времени. Здесь можно выделить вклад автора, заключающийся в получении выражений как для величины суммарного накопленного объема жидкостей в момент прорыва вытесняющей жидкости к стоку, так и для времени прорыва, которые дают оценки,

хорошо совпадающие с результатами эксперимента; а также вывод системы уравнений, описывающих динамику обводнённости стока пористого массива для случая плоско-параллельного течения.

Основные результаты диссертационной работы **получены лично автором**: разработан **новый** метод непрерывного измерения водонасыщенности порового пространства, основанный на оптических свойствах лабораторной модели пористого коллектора, а также оригинальное программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс регистрации экспериментальных данных. Лично автором была проведена серия опытов по вытеснению вязкой жидкости из модели пористого коллектора с помощью менее вязкой жидкости и на основании их результатов предложена аналитическая модель описания двухфазных струйных течений. Диссидентом был проведён анализ данных эксплуатации ряда скважин Приобского нефтяного месторождения и предложен аналитический метод описания роста во времени обводнённости добывающих скважин.

Наряду с несомненными достоинствами, в диссертационной работе А.Н. Барышникова имеется ряд **дискуссионных моментов и недостатков**.

1. Из работы непонятно, почему для моделирования нефтяного коллектора использовался сжатый поролон, обладающий совсем другими структурными свойствами: в частности проницаемость и пористость такой среды существенно выше, чем нефтесодержащей породы. Нам представляется, что для обоснованности выбора лабораторной модели необходимо было провести анализ размерностей и установить критерии подобия с применением известной  $\pi$ -теоремы. В этом случае перенос результатов на натурные объекты был бы более достоверным.

2. В работе недостаточно внимания уделяется физико-химическим аспектам задачи. В частности, совсем не исследован вопрос влияния поверхностно-активных веществ на устойчивость фронта вытеснения.

3. В работе не проведена оценка времени установления капиллярного равновесия, а, между тем, оно существенно влияет на процесс развития фильтрационной неустойчивости.

4. Существует ли порог по давлению при вытеснении одной жидкости с помощью другой? Известно, что такой порог существует в случае ряда гидрофильно-гидрофобных пористых структур (например, полимерных мембран) при фильтрации через них водно-органических смесей. Казалось бы, что подобный порог должен существовать и для нефтесодержащих пород.

5. Автору следовало бы аккуратнее быть с нефтяной терминологией. Например, непонятен используемый автором термин «подвижность жидкости». Нам известно понятие подвижности иона, а что такое подвижность жидкости в известной нам литературе не встречается.

6. Работа в целом добросовестно и аккуратно оформлена, имеются информативные цветные иллюстрации, однако автору не удалось совсем избежать шероховатостей в правописании, связанных с неправильным употреблением слов «также» и «так же». Есть вопросы и к представлению результатов: например, рис. 3.8 на стр. 89 и рис. 4.2 на стр. 113 диссертации слишком мелкие и адекватно не воспринимаются. Поскольку в работе достаточно много обозначений, то для удобства чтения диссертации их список следовало бы вынести в приложение.

Однако перечисленные замечания, ряд которых представляет собой пожелания на дальнейшую научную деятельность соискателя, не умаляют достоинств

диссертационной работы Н.А.Барышникова, выполненной им на высоком научном уровне.

Диссертационная работа обсуждалась на расширенном научном семинаре кафедры высшей математики Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина с участием ведущих специалистов в области массообменных процессов в мембранных системах, пористых средах и математического моделирования. Протокол заседания № 4 от 01 апреля 2014 года. На основании проведенного обсуждения диссертации Н.А. Барышникова в целом, ведущая организация ее оценивает как законченную фундаментальную научную работу, в которой на основании выполненных автором исследований получены экспериментальные и теоретические результаты, совокупность которых можно квалифицировать как новое научное достижение в области экспериментального и математического моделирования фильтрационной неустойчивости фронта вытеснения разновязких жидкостей из пористых сред с учётом влияния капиллярных сил.

Содержание диссертационной работы изложено в 14 публикациях, в том числе в трех статьях, входящих в перечень, рекомендуемый ВАК. Результаты исследований Н.А. Барышникова были представлены на Международных и Всероссийских конференциях.

Автореферат и публикации соответствуют основному содержанию диссертации, которая написана хорошим литературным и научным языком.

Таким образом, рассмотренная диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Она выполнена на высоком научном уровне, и на основе экспериментально полученных распределений средней по сечению вдоль потока водонасыщенности автор предлагает *новую* аналитическую модель двухфазного струйного фильтрационного течения с учётом влияния капиллярных сил, которая адекватно описывает результаты лабораторных экспериментов. Содержание диссертации соответствует требованиям паспорта специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых», поскольку имеется полное соответствие четырем пунктам паспорта специальности: п.7 и пп.10-12 и в качестве аппарата исследования используются современные экспериментальные и математические методы.

Диссертация полностью отвечает критериям пункта 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ» в отношении кандидатских диссертаций, а ее автор, Барышников Николай Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Заведующий кафедрой высшей математики,  
доктор физико-математических наук  
профессор

В.В. Калинин

Кандидат физико-математических наук,  
доцент

Д.Ю.Ханукаева