

**отзыв**

**официального оппонента на диссертацию Барышникова Николай 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»**

**Содержание работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во введении обоснована актуальность работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, формулируются цели исследования и основные положения, защищаемые в диссертации.

**В первой главе** представлен обзор методов описания многофазной фильтрации, приведены основные понятия подземной гидродинамики. Рассмотрены одномерные модели двухфазной фильтрации Бакли-Леверетта, Рапопорта-Лиса, Баренблатта. В разделах, посвящённых вопросу устойчивости плоского фронта вытеснения вязкой жидкости, сформулирован критерий устойчивости границы раздела разновязких жидкостей в задаче Саффмана-Тейлора, представлено исследование устойчивости решения задачи Бакли-Леверетта. Сформулирована постановка задачи исследования. В целом обзор демонстрирует достаточно полное знакомство автора с современным состоянием исследований по теме диссертации.

**Вторая глава** посвящена описанию лабораторных экспериментов по вытеснению вязкой жидкости из пористого массива при помощи другой, менее вязкой. В первом разделе подробно описывается экспериментальная установка, методы и подходы, использованные при проведении серии опытов. Автор уделяет особое внимание применяемой методике измерения объёмной доли вытесняющей жидкости в поровом пространстве модельного коллектора, заключающейся в сопоставлении количества света, проходящего через различные участки модели, с величиной локальной водонасыщенности. Во втором разделе второй главы автор описывает результаты серии из 27 опытов по вытеснению вязкой жидкости из плоского пористого массива, отличающихся соотношением вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей. Даётся подробное описание наблюдаемого в опытах процесса неустойчивого вытеснения. Представлены результаты наблюдения за распределением средней водонасыщенности пористого массива вдоль направления фильтрационного потока. В результате лабораторного моделирования автором обнаружено явление формирования фронта вытеснения, состоящего из отдельных струй вытесняющей жидкости. Это противоречит традиционным представлениям о том, что при неустойчивом струйном вытеснении первая струя вытесняющей жидкости неограниченно разрастается в направлении фильтрационного потока, препятствуя тем самым росту остальных струй. Автором обнаружено, что условный фронт вытеснения формируется при сколь угодно малых соотношениях вязкостей. При этом величина усреднённой по сечению массива водонасыщенности на струйном фронте вытеснения в различных опытах мало зависит от соотношения вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкости, много меньших единицы. При отношении вязкостей порядка 1 : 10 величина средней водонасыщенности на фронте вытеснения в различных опытах начинает расти по мере увеличения вязкости вытесняющей жидкости. Результаты опытов представлены в виде графиков, таблиц и иллюстраций.

**В третьей главе** проводится анализ результатов эксперимента и предлагается аналитическая модель продвижения неустойчивого фронта вытеснения вязкой жидкости из пористой среды. На основе предположений о струйном характере течения составлена система уравнений относительно скоростей фильтрации жидкостей и соотношения объёмов жидкостей в поровом пространстве массива. В результате решения этой системы

уравнений получен ряд соотношений, определяющих распределение водонасыщенности порового пространства массива (усреднённой по площади его поперечного сечения) вдоль направления фильтрационного потока. Автор условно делит пространство пористого массива, занятого струями вытесняющей жидкости, на две части: область фронта вытеснения и область фильтрационного потока за фронтом вытеснения. Эти области отличаются характером изменения средней водонасыщенности с расстоянием вдоль направления потока. Сопоставление полученных теоретических зависимостей с результатами лабораторного моделирования показывает хорошее их соответствие на всём протяжении потока за фронтом вытеснения. При этом изменение средней водонасыщенности в области фронта вытеснения, по мнению автора, определяется начальной кривизной фронта вытеснения. Автор рассматривает задачу о формировании начального фронта вытеснения и получает систему уравнений, решение которой хорошо описывает экспериментальные распределения средней водонасыщенности на всём протяжении фильтрационного потока. Явление формирования струйного фронта вытеснения, по мнению автора, объясняется влиянием сил поверхностного натяжения. Автор предлагает физический механизм, определяющий влияние капиллярных сил на величину усреднённой водонасыщенности на фронте вытеснения. Для этого автором составлена система уравнений относительно величин среднего капиллярного давления и средней водонасыщенности. С использованием ряда обоснованных упрощений автором получено выражение для оценки величины средней водонасыщенности на фронте вытеснения. Показано соответствие полученных теоретических оценок и результатов экспериментов. В заключении третьей главы на основе анализа распределения средней водонасыщенности вдоль фильтрационного потока автором предложена методика описания динамики продвижения струйного фронта вытеснения. В предположении о постоянстве перепада давления на концах пористого массива автором получены выражения для законов изменения со временем объёмного расхода жидкостей, суммарного объёма жидкостей, прошедших через пористый массив, координаты фронта, а также выражения для времени прорыва вытесняющей жидкости к стоку и суммарного накопленного объёма жидкостей в момент прорыва. Показано хорошее соответствие теоретических зависимостей и результатов экспериментов.

В **четвёртой главе** автором рассмотрена динамика изменения обводнённости стока при вытеснении вязкой жидкости из пористого массива. С использованием предложенной модели вытеснения получена система уравнений, позволяющая получить закон изменения обводнённости со временем при постоянном перепаде давления. Автором делается предположение, что аналогичные уравнения для обводнённости могут быть записаны и для случая потока между точечным источником и стоком в бесконечном пористом массиве, что соответствует упрощённому представлению нагнетательной и добывающей скважин при разработке нефтегазового месторождения. В работе приводится анализ с позиций предложенной модели данных эксплуатации ряда скважин Приобского месторождения нефти, результаты представлены в виде графиков и таблиц. Делается вывод о возможности применения математической модели струйного вытеснения для описания процесса заводнения реальных коллекторов.

**В заключении** кратко сформулированы основные результаты диссертации.

**Актуальность выполненных исследований.**

Значительная доля разрабатываемых месторождений углеводородов содержит трудно извлекаемые запасы. Сложности разработки подобных месторождений связаны с высокими вязкостями добываемых углеводородов, со значительной степенью неоднородности фильтрационных свойств коллекторов. Точное прогнозирование динамики продвижения фронта заводнения при таких условиях не всегда возможно в связи с недостаточностью сведений о внутреннем строении коллекторов, проведение численного моделирования неустойчивых фильтрационных процессов требует значительных вычислительных ресурсов и времени. Это обуславливает актуальность

задачи изучения неустойчивости фронта вытеснения и построения аналитической модели развития возмущений фронта вытеснения вязкой жидкости в пористой среде.

Научная новизна выполненных исследований. В ходе работы автором получен ряд новых результатов, касающихся процесса вытеснения вязких жидкостей из пористой среды. Впервые описано явление формирования устойчивого струйного фронта вытеснения при малых соотношениях вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкостей. Автором предложен новый подход к описанию неустойчивых двухфазных плоско-параллельных течений, основанный на модельном распределении средней водонасыщенности вдоль направления фильтрации.

Практическое значение проведенных исследований. 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. Достоверность и степень обоснованности выводов и рекомендаций. Основные выводы диссертационной работы базируются на тщательном анализе данных лабораторных экспериментов, сопоставлены с результатами, полученными другими исследователями ранее, получены с использованием фундаментальных научных принципов, достаточно обоснованы и защищены текстом диссертации.

#### Замечания к работе:

Замечания к данной работе можно разделить на две категории – принципиальные и технические. Замечания первой категории сводятся к тому, что проницаемость в эксперименте порядка одного Дарси, а в реальных породах она примерно на три порядка меньше. Это вызвано техническими возможностями лабораторных экспериментов, которые невозможно проводить слишком долго. Однако это ограничение требует большего внимания к проблеме подобия и масштабирования параметров лабораторных экспериментов, а также их адекватности. Уменьшение размеров пор и капилляров приводит не только к уменьшению проницаемости, но и к влиянию стенок пор на характер физико-химических процессов в самих порах. Эти аспекты в недостаточной степени отражены в данной работе.

Что же касается чисто технических замечаний, то в работе не уделяется внимание вопросам смачиваемости матрицы модельного материала используемыми жидкостями. При описании проведенных экспериментов не приведен анализ ошибок измерений и источников разброса данных (что связано с особенностями изучаемого процесса, а что – с используемой методикой измерений). На некоторых рисунках (рис.2.4, 2.5, 2.7, 2.9) не показан масштаб. На рис.3.4, 3.7 маркерами показаны экспериментальные данные, а не экспериментальная зависимость.

#### ОБЩАЯ ОЦЕНКА РАБОТЫ

Значимость замечаний первой категории выходит за рамки кандидатской диссертации и относится больше к постановке задачи, а не к ее выполнению. Их можно рассматривать скорее как пожелание на будущее. Все высказанные замечания не сказываются на общей положительной оценке рецензируемой диссертации, которая выполнена на актуальную тему, характеризуется научной и практической значимостью. Диссертация Барышникова Н.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача, имеющая, большое практическое значение – разработка аналитической модели продвижения неустойчивого фронта заводнения при разработке нефтегазового коллектора.

Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и сборниках, апробированы на конференциях и семинарах. Опубликованные работы и автореферат правильно отражают основное содержание диссертации.

Диссертация отвечает требованиям положения ВАК РФ о порядке присуждения учёных степеней, а её автор Барышников Николай Александрович заслуживает

присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Рецензент даёт свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой докторской диссертации, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,

Главный научный сотрудник института

Доктор физико-математических наук

А.В. Каракин

Подпись А.В. Каракина заверяю

Ученый секретарь ФГУП ГНЦ РФ

ВНИИгеосистем

Кандидат геолого-минералогических наук



А.Г. Горелов

**Отзыв официального оппонента  
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**

**Структура и объем представленного материала**

На отзыв представлена диссертационная работа “Двухфазные струйные течения в пористых средах” и автореферат. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы (93 наименования). Работа изложена на 129 страницах машинописного текста, включая 27 рисунков и 4 таблицы.

Автореферат работы изложен на 27 страницах и содержит 14 рисунков.

**Актуальность темы диссертационной работы**

Резкое сокращение запасов нефти в недрах Земли и возрастание доли трудноизвлекаемых запасов ставит задачу об оптимизации методов разработки нефтяных пластов с целью повышения нефтеотдачи.

В настоящее время выработка запасов вязких нефтей из месторождений не превышает 30%. Выработка запасов нефти на месторождениях легких нефтей, залегающих в низкопроницаемых коллекторах, также близка к 30 - 35%. В подгазовых зонах выработка запасов нефти еще ниже - на уровне 10 - 20%.

Одним из основных методов интенсификации добычи нефти является метод заводнения, суть которого состоит в нагнетания воды в поровое пространство коллектора с целью поддержания пластового давления на постоянном уровне.

Эффективность метода заводнения во многом определяется схемой взаимного расположения нагнетательных и добывающих скважин, а также объемом и режимом закачки воды. От выбора этих параметров зависят коэффициент извлечения нефти, объемы капитальных вложений на разбуривание месторождений и эксплуатационные затраты.

Частой проблемой, возникающей при использовании данного метода, является ранний прорыв воды от нагнетательной к добывающей скважине и, как следствие, быстрое обводнение последней. Основная часть запасов в зоне дренирования добывающей скважины остается при этом не извлеченными.

Причинами раннего прорыва воды является наличие высокопроницаемых пропластков в неоднородных коллекторах, а для однородных коллекторов с нефтями повышенной вязкости - неустойчивость границы раздела жидкостей.

Для обеспечения эффективности метода заводнения и обоснования технологических режимов работы скважин требуется решение сложной задачи о неустойчивом взаимном вытеснении несмешивающихся разновязких жидкостей в неоднородной пористой среде, что, в свою очередь, требует развитие как новых экспериментальных методик, так и теоретических моделей.

Представленная диссертационная работа направлена на проведение экспериментальных исследований и построение аналитической модели развития фильтрационной неустойчивости фронта вытеснения разновязких жидкостей из пористых сред с учётом влияния капиллярных сил.

Таким образом, избранная соискателем тема диссертационного исследования представляется актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

### **Научная новизна полученных результатов**

Ряд результатов, полученных в ходе проведенных исследований по теме диссертационной работы, обладают несомненной научной новизной.

В первую очередь к таким результатам можно отнести следующие положения и выводы.

1. Разработан метод регистрации распределения насыщенности жидкостей в поровом пространстве оптически прозрачных пористых сред, позволяющий в реальном времени исследовать динамику взаимного вытеснения жидкостей.
2. Экспериментально обнаружено, 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 соотношениях вязкостей вытесняющей и вытесняемой жидкости как меньше, так и больше единицы.
3. Предложена аналитическая модель двухфазного струйного фильтрационного течения с учётом влияния капиллярных сил, которая адекватно описывает результаты лабораторных экспериментов.

Перечисленные научные результаты диссертационной работы являются новыми и вносят ощутимый вклад в исследование неустойчивости фронта вытеснения разновязких жидкостей в пористых средах.

### **Практическая ценность полученных результатов**

Практическая значимость работы не вызывает сомнений и подтверждается, в частности, хорошим воспроизведением динамики обводнённости ряда добывающих скважин Приобского месторождения с помощью полученной в работе аналитической зависимости.

Разработанная модель двухфазного струйного фильтрационного течения, учитывая влияние капиллярных сил на границах раздела фаз, позволяет более адекватно описывать явления, возникающие при продвижении фронта вытеснения в нефтегазовом коллекторе в процессе его заводнения, и может быть использована на практике для оптимизации метода заводнения и обоснования технологических режимов работы нагнетательных скважин.

### **Обоснованность и достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов работы обусловлена представительным набором лабораторных экспериментальных данных, а также согласованностью теоретических результатов с данными лабораторных и натурных экспериментов.

Достоверность уравнений аналитической модели обусловлена строгим выводом её положений из фундаментальных законов гидродинамики, физической обоснованностью используемых гипотез и упрощений, а также сопоставлением теоретических предсказаний с экспериментальными данными.

Достоверность результатов лабораторного моделирования подтверждается повторяемостью и воспроизводимостью полученных данных в пределах погрешности лабораторных измерений.

### **Оценка качества оформления диссертации**

Диссертационная работа Барышникова Н.А. четко структурирована, хорошо оформлена, характеризуется научной строгостью и последовательностью изложения материала. Текст диссертации хорошо иллюстрирован цветными графиками, фотографиями и таблицами. Автореферат с достаточной полнотой отражает основные положения диссертации, выдержан по форме и объему.

### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК, а также доклады в сборниках трудов и тезисов международных конференций.

Научные материалы, опубликованные по теме диссертационного исследования, в достаточной степени раскрывают основное содержание представленной работы, отражают её основные положения и результаты.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. К сожалению, в тексте диссертационной работы присутствует ряд опечаток и неточностей, что затрудняет её чтение
  - а. В списке литературы имеются три повтора (№60,61,66 и 89,91,93)
  - б. В таблице 1 на странице 64 заголовки второй и третьей колонок совпадают
  - в. В таблице 1 на странице 64 неверно указана размерность вязкости во второй и третьей колонках
  - г. Страница 110, первый абзац "...средняя водонасыщенность распределена вдоль пористого массива согласно выражению (3.32)" – по-видимому, ссылка должна быть на формулу (3.33)
2. Не совсем понятно, как из формулы (3.24) на странице 94 получено выражение для относительного изменения насыщенности  $\Delta\sigma/(\sigma+\Delta\sigma)$ . Как учитывается распределение пор по размерам?
3. Содержащийся в параграфе 2.2 второй главы анализ результатов лабораторных экспериментов по взаимному вытеснению жидкостей следовало бы представить в виде соответствующих графиков с указанием погрешности измерений. Содержащиеся в таблице 2 времена прорыва вытесняющей жидкости к стоку и объёмы струй вытесняющей жидкости в момент прорыва для различных отношений вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей анализировать сложно, т.к. параметры (начальный перепад давления и проницаемость пористой среды, см. Таблицу 1) проведённых опытов немного различаются. Тем самым, напрашивается представление результатов в виде безразмерных параметров.
4. Эксперименты по взаимному вытеснению жидкостей проведены для модельной, достаточно однородной, пористой среды - поролон (полиуретан). Однако большинство реальных пород, слагающих коллектора нефти и газа, характеризуются некоторой неоднородностью, причем не только проницаемости, но и распределения смачиваемости (см., например [Anderson W.G. (1987). Wettability literature survey – part 4: The effect of wettability on capillary pressure. Journal of Petroleum Technology. # 10. pp. 1283 – 1300; Anderson W.G. (1987). Wettability literature survey – part 5: The effect of wettability on relative permeability // Journal of Petroleum Technology. # 11. pp. 1453 – 1468]). Анализ влияния амплитуды вариации проницаемости и смачиваемости на формирования неустойчивости фронта вытеснения нефти водой в пористых средах в работе не выполнен. При какой степени неоднородности пористой среды причиной нарушения фронта вытеснения является вязкостная неустойчивость?

## Общая оценка работы

Отмеченные в отзыве замечания не снижают общий научный уровень работы и не могут повлиять на положительную оценку работы.

Автореферат выполнен с соблюдением установленных требований и с достаточной полнотой отражает основные положения диссертации.

Основные положения диссертации прошли достаточную апробацию на международных конференциях, нашли отражение в 14 печатных работах, в том числе 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

В целом диссертация Барышникова Н.А. «Двухфазные струйные течения в пористых средах» является законченной научно-квалификационной работой, имеющей научную и практическую ценность и отвечающей требованиям Положения 9 ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям.

В представленной работе содержится решение (разработана и подтверждена путем сравнения с проведенными лабораторными экспериментами аналитическая модель двухфазного струйного фильтрационного течения), имеющее существенное значение для развития теоретических представлений о процессе формирования неустойчивости фронта вытеснения нефти водой в пористых средах. Тематика работы соответствует паспорту специальности 25.00.10 - Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых.

Автор диссертационной работы Барышников Николай Александрович заслуживает присуждения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук.

старший научный сотрудник  
московского научно-исследовательского центра  
Schlumberger  
к.ф.-м.н.

Д.Н.Михайлов

почтовый адрес:  
119285, г.Москва, ул. Пудовкина  
E-mail: dmikh@yandex.ru



2014  
Д.Н.Михайлов