

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Черновой Анны Александровны
на тему: «Исследование многофазной фильтрации при водогазовом
воздействии на анизотропные нефтяные пласты с учетом
гравитационных и капиллярных эффектов»
по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы**

Диссертация А.А. Черновой посвящена разработке теории вытеснения многокомпонентной нефти из пласта, имеющего анизотропную проницаемость, с учетом гравитационных и капиллярных эффектов в рамках многофазной фильтрации. Известно, что заводнение нефтяных пластов, которое является традиционной технологией при добыче нефти, не всегда является эффективным, в частности, из-за неустойчивости типа Саффмана-Тейлора границы вода-нефть и образования в ее результате пальцев воды, проникающих в нефть, что сильно уменьшает коэффициент вытеснения нефти. Дополнительная закачка газа может увеличить нефтеотдачу в связи с тем обстоятельством, что газ растворяется в нефти, снижая ее вязкость и плотность, что способствует стабилизации границы вода-нефть. Однако закачка газа и последующая его сепарация от извлеченной нефти требуют дополнительных расходов по сравнению с закачкой чистой воды. Задача состоит в том, чтобы найти баланс между прибылью от дополнительного извлечения нефти и расходами на закачку газа. При водогазовом воздействии необходимо учитывать целый набор эффектов: неоднородность строения пластов (анизотропное распределение проницаемости), многокомпонентную структуру насыщающих их жидкостей, капиллярные эффекты и т. д. Насколько я понял, влияние этих эффектов на нефтеотдачу в имеющейся на этот предмет литературе изучено недостаточно подробно и их влияние исследовалось в основном по отдельности. Основной целью данной диссертации является обобщающее исследование указанных факторов и их совместного влияния на эффективность водогазового воздействия на нефтяные пласты.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, состоящего из 116 наименований. В работе содержится 53 рисунка, а также одна таблица.

Во **введении** дается обзор степени разработанности темы, сформулирована цель работы, обоснована ее актуальность и новизна,

описаны известные результаты анализа водогазового воздействия на пласт, а также сформулированы выносимые на защиту положения.

В **первой главе** приводится общее описание задач, исследуемых в последующих главах диссертации. Предполагается, что сектор пласта имеет форму параллелепипеда и имеет два прямоугольных горизонтальных измерения и некоторую толщину. Для обозримости описания исследуются однородные пласты, имеющие эффективные (осредненные по сектору) значения пористости и проницаемости; при этом проницаемость задается анизотропным тензором с главными направлениями вдоль осей декартовой системы координат. В начальный момент времени пласт насыщен нефтью заданного компонентного состава, давление имеет гидростатическое распределение, а температура постоянна. Предполагается, что процесс фильтрации происходит при постоянной температуре. Предполагается также, что в течении, в процессе фильтрации, присутствуют три фазы: жидкая фаза воды, нефти и фаза углеводородного газа. Предполагается, что вода не смешивается с углеводородными компонентами. Приводится система уравнений изотермической фильтрации n -компонентной углеводородной смеси с углекислым газом и воды, состоящая из уравнений неразрывности для углеводородных компонент, углекислого газа и воды, а также закона Дарси для скоростей и давлений фаз. Система уравнений замыкается дополнительными уравнениями для фазовых давлений и относительных фазовых проницаемостей. Используется специальное кубическое уравнение состояния, позволяющее по заданным давлению, температуре и компонентному составу рассчитать все параметры среды. Формулируются различные стратегии закачки газа и воды: закачка воды, газа, сначала воды, потом газа, наоборот и одновременная закачка воды и газа. В каждой стратегии закачиваемый газ представляет собой чистый углекислый газ. Приводится демонстрационный пример закачки в пласт чистого газа, показывающий, что на процесс фильтрации влияют три фактора: гравитационное расслоение фаз, анизотропное распределение проницаемости и капиллярные эффекты. Нагнетающие и добывающие скважины расположены горизонтально. Показано, что трехмерную задачу можно свести к двумерной и рассматривать течение в плоскости сечения сектора, перпендикулярного к скважинам.

Во **второй главе** обсуждается влияние на процесс вытеснения в пористой среде гравитационного расслоения фаз, анизотропного распределения проницаемости, капиллярных эффектов и положения скважин. Предполагается, что вытеснение из анизотропной пористой среды происходит одной несжимаемой жидкостью, а вытесняется другая

несжимаемая жидкость. При вытеснении водой в рамках описанной в предыдущей главе постановки задачи фаза газа не образуется и уравнение неразрывности для компонент нефти упрощается. Рассматривается отдельно также вытеснение нефти газом. При этом считается, что нефть и газ не смешиваются, то есть фаза газа состоит только из углекислого газа. Рассматривается двумерная постановка задачи изотермической фильтрации в прямоугольной области, описывающей срез проницаемого пласта перпендикулярно двум горизонтальным скважинам и между ними. Считается, что пористость однородна, а проницаемость — анизотропна с разными значениями вдоль осей декартовой системы координат. В зависимости от горизонтальной длины пласта, его толщины и локализации скважин, пористости и проницаемости пласта, плотности и вязкости закачиваемых жидкостей, а также объемного расхода закачки, в пласте могут реализовываться различные режимы течения. При фиксированной локализации скважин явление вытеснения одной жидкостью (газом) другой характеризуется следующими параметрами: горизонтальной длиной слоя, толщиной слоя, тремя масштабами давления: гидродинамическим, гравитационным и капиллярным, двумя масштабами скорости: гидродинамическим и гравитационным. Обсуждаются критерии подобия, характеризующие анизотропное распределение проницаемости, подвижности фаз. Приводится безразмерная постановка задачи вытеснения, содержащая четыре критерия подобия: анизотропного распределения проницаемости A , подвижности фаз M , направления течения внутри области Γ и толщины переходной зоны между вытесняющей и вытесняемой жидкостями P . Приводится классификация режимов при больших и малых значениях параметров подобия. Показано, что режимами вытеснения можно управлять, изменяя горизонтальную длину пласта и объемный расход закачки. Построены карты оптимального положения нагнетающей и вытесняющей скважин (источника и стока, соответственно), максимальных коэффициентов извлекаемой жидкости и коэффициента, характеризующего долю пласта, охваченную вытесняющей жидкостью.

В третьей главе исследовано влияние фазовых переходов на эффективность газового воздействия в режиме, когда $A \gg 1$ и $\Gamma \gg 1$, когда реализуется режим одномерного течения от источника к стоку. Рассматривается одномерная постановка задачи фильтрации. Горизонтальная пространственная координата изменяется на отрезке длины L . Закачка углекислого газа и воды и отбор нефти газа и воды через скважины моделируются с помощью точечных источника и стока, расположенных в начале и конце отрезка, соответственно. Приводится

система уравнений, описывающих фильтрацию четырехкомпонентной углеводородной смеси с углекислым газом и воды, состоящая из соответствующих уравнений неразрывности и законов Дарси для газа, нефти и воды. Приведены экономические оценки чистой приведенной стоимости водогазового воздействия, характеризующие экономическую целесообразность водогазового воздействия на пласт. Показано, что оптимизация (достижение величиной, характеризующей приведенную стоимость, максимума) водогазового воздействия при низких ценах на нефть отличается от оптимизации при высоких ценах на нефть. Показано, что стратегии закачки углекислого газа на поздних стадиях разработки месторождения, требуют использования больших объемов закачиваемого газа, чем когда эта закачка происходит на ранних стадиях разработки. Закачку углекислого газа следует рассматривать в качестве основного метода добычи, если пласт имеет достаточно высокую проницаемость. Проведено сравнение эффективности стратегий закачки воды, газа, воды и газа с другими стратегиями, учитывающими одновременную закачку воды и газа, а также поочередную закачку воды и газа, содержащую несколько циклов. Построена карта оптимальных стратегий при различных скоростях закачки и ценах на нефть.

В четвертой главе дается оценка взаимного влияния стратификации фаз и фазовых превращений на фильтрацию при водогазовом воздействии. Рассматривается двумерная постановка задачи изотермической фильтрации в прямоугольной области, соответствующей срезу проницаемого пласта, перпендикулярно горизонтальным скважинам. В отличие от главы 2 рассматривается трехфазная фильтрация. Определены критерии подобия, характеризующие различные режимы трехфазного течения. Исследовано распределение параметров при режиме, отвечающем $A \gg 1$ и $\Gamma \ll 1$, описанного во второй главе, при различных стратегиях закачки, а также проводится сравнение эффективности различных стратегий. Получены оценки эффективности стратегий при диагональном положении скважин в области фильтрации. Показано, что в переходных режимах, когда существенными становятся процессы, связанные с влиянием как гравитационного расслоения фаз, так и анизотропным распределением проницаемости и трехфазным характером течения, в отличие от упомянутых выше предельных режимов, фазовые переходы, происходящие на этапе закачки газа, существенно изменяют направление течения воды на последующих этапах.

В заключении формулируются основные результаты работы.

Специального упоминания, на мой взгляд, заслуживают следующие результаты, полученные в диссертации.

1. Дана классификация асимптотических режимов вытеснения жидкости из пласта с анизотропной проницаемостью при наличии гравитации. В зависимости от влияния факторов, связанных с силой Архимеда и особенностями распределения проницаемости выделено четыре случая, характеризующиеся асимптотическим поведением безразмерных параметров.

2. В зависимости от двух безразмерных параметров подобия построены карты коэффициентов извлекаемой жидкости и коэффициента, характеризующего долю пласта, охваченную вытесняющей жидкостью, которые характеризуют эффективность вытеснения. Построены карты положений скважин, при которых реализуется максимальное значение этих коэффициентов.

3. Проанализировано влияние фазовых переходов между нефтью и закачиваемым газом на трехфазные течения (газовая фаза, нефть и вода) с учетом гравитационного расслоения фаз и анизотропного распределения проницаемости.

4. Показано, что в ряде случаев предельного значения физических параметров, оценки оптимальных параметров закачки, полученные при одномерном моделировании, могут использоваться и для двумерных течений.

Результаты диссертации являются достоверными и полностью обоснованными, так как при их получении использовались точные теоретические методы математики, фундаментальные методы механики сплошной среды, а также апробированные методы численного расчета. Все декларированные в диссертации результаты являются новыми и представляющими значительный интерес. С практической точки зрения, стоит отметить предложенный в диссертации способ оптимизации водогазового воздействия на нефтяные пласты, основанный на использовании специального параметра подобия, характеризующего как физические, так и экономические проблемы вытеснения. На мой взгляд, этот способ может использоваться при разработке соответствующих нефтяных месторождений.

Диссертация написана ясным и доступным языком, результаты изложены понятно. К возможным недостаткам работы я бы отнес следующие.

1. В диссертации исследуются секторы нефтяного пласта, имеющие форму параллелепипеда с прямоугольным основанием и высотой H . Между

тем, встречающиеся в природе пласты обладают искривленной формой. Мне представляется, что наряду с прямоугольной, следовало бы рассмотреть ряд модельных ситуаций, где соответствующие нефтяные пласты имеют искривленную форму.

2. Во всех задачах, рассмотренных в диссертации, предполагается, что граница между вытесняющей и вытесняемой жидкостью является гладкой, тем самым не рассматриваются процессы, связанные с неустойчивостью границы раздела, что ведет к перемешиванию жидкостей.

3. Кроме того, в диссертации имеются небольшое количество опечаток (см., например, стр. 36 в конце) и местами имеет место некоторая небрежность изложения (например, безразмерный коэффициент приведенной стоимости впервые упоминается на стр. 79, а выражение для него приведено только на стр. 80).

Указанные замечания 1, 2 носят рекомендательный характер, и все замечания не меняют результатов и никак не влияют на высокую оценку диссертации в целом.

Диссертация А.А. Черновой на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук представляет собой законченное научное исследование, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, которые можно квалифицировать как научное достижение. В диссертации получен целый ряд новых результатов. Результаты интересны и представляются важными, в том числе и для приложений, в первую очередь для проблем, связанных с разработкой нефтяных месторождений, а также захоронения в них углекислого газа.

Результаты диссертации могут найти применение в работе, например, следующих организаций: НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени

доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Чернова Анна Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор
ведущий научный сотрудник отдела механики
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
науки Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии
наук

ИЛЬИЧЕВ Андрей Теймуразович

16.05.2025

Контактные данные:

тел.: +7(495)9848141*3736, e-mail: ilichev@mi.ras.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Губкина, д. 8,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Математический институт им. В.А. Стеклова Российской академии наук,
отдел механики
Тел.: +7(495)9848141; e-mail: ilichev@mi.ras.ru

Подпись сотрудника Математического института
им. В.А. Стеклова РАН А.Т. Ильичева
Ученый секретарь Математического
института им. В.А. Стеклова РАН

С.А. Поликарпов