

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию, представленную 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»**

Проблемы разработки месторождений жидких углеводородов на современном этапе связаны с возрастающим числом факторов, препятствующих их добыче. К ним, прежде всего, относятся общее истощение разведанных ресурсов и высокая степень обводнённости эксплуатируемых месторождений. Для увеличения коэффициента извлечения нефти «старых» месторождений и эффективного освоения новых, требуются подходы и технологии, максимально учитывающие совокупность механических и физико-химических особенностей пластов. Эта цель может быть достигнута только при достаточно глубоком понимании взаимосвязи различных параметров и свойств пластов на основе тщательного научного анализа процессов, сопровождающих добычу углеводородного сырья.

Кандидатская диссертация Черновой Анны Александровны посвящена изучению влияния гравитационных и капиллярных сил, анизотропного распределения проницаемости и фазовых переходов углеводородных компонентов на эффективность водогазового воздействия на нефтяные пласты. Решение перечисленных задач фильтрации жидкостей и газов в пористых средах необходимо для разработки и обоснования новых технологий.

Представленная работа удачно сочетает постановку фундаментальных задач с достаточно очевидными практическими приложениями результатов решения этих задач. Поэтому *актуальность*

работы не вызывает сомнений. **Обоснованность и достоверность** полученных в диссертации результатов обеспечивается использованием классических моделей, основанных на законах сохранения, корректной постановкой задач, использованием тщательно протестированных пакетов программ и контролем сходимости численных решений.

В **обзоре литературы** автор диссертации чётко и в краткой форме излагает основные этапы развития методов математического моделирования процессов добычи углеводородов из пласта методами вытеснения с последовательным учётом возрастающего количества факторов, характеризующих состояние пластов и свойств закачиваемых реагентов. В заключительной части обзора приводится анализ стратегий добычи углеводородного сырья, в котором продемонстрированы различные подходы в оценке их эффективности. Обзор полностью выполнил роль научной основы для формулировки цели и задач исследования. Одновременно он стал подтверждением новизны выполненной работы.

Для описания вытеснения нефти с помощью закачки газа и воды в **первой главе** автором представлена замкнутая система уравнений многофазной фильтрации с учётом переменных концентраций компонент, проницаемости, насыщенности и других параметров задачи с уравнением состояния Соаве–Редлиха–Квонга. Представлены результаты некоторых предварительных расчётов, на основе которых было показано, что вместо трехмерной модели пласта, вскрытого двумя горизонтальными скважинами, удобно рассмотреть плоскую задачу фильтрации.

Важные результаты получены во **второй главе**. Рассматривается вытеснение одной несжимаемой жидкости другой также несжимаемой жидкостью из пористой среды. Построена классификация предельных режимов вытеснения жидкости из анизотропного пласта в поле силы тяжести. Выделено четыре асимптотических случая, характеризующихся различным влиянием силы Архимеда и анизотропного распределения

проницаемости. В фазовой плоскости предложенных критериев подобия построены и проанализированы карты эффективности вытеснения. Показано, что при малом влиянии капиллярного давления и фиксированных положениях скважин эффективность вытеснения увеличивается с гравитационным числом. Также Чернова А.А. исследует влияние варьирования положений скважин на эффективность вытеснения в различных режимах. В ее работе представлены группировки оптимальных положений скважин, при которых достигаются максимальные коэффициенты эффективности.

В *третьей главе* исследуется влияние фазовых переходов при водогазовом воздействии на нефтенасыщенный пласт. Проведено сопряжение фильтрационной и экономической модели для расчета рентабельности водогазового воздействия. Построен рейтинг оптимальных стратегий закачки для достижения максимальной эффективности в зависимости от скоростей закачки и экономических оценок. Показано, что исследование оптимальных стратегий при варьировании продолжительности эксплуатации месторождения позволяет достичь более высоких значений коэффициента эффективности. Рассчитаны оптимальные объемы закачки воды и газа и показано, что при закачке углекислого газа на более поздних стадиях требуется использование больших объемов  $\text{CO}_2$ , особенно при одновременной закачке воды и газа на последней стадии разработки месторождения.

*Четвертая глава* посвящена обобщению результатов диссертации, полученных в главах 2-3. Автор рассматривает профильную постановку задачи фильтрации при водогазовом воздействии на нефтенасыщенные пласты и исследует влияние трехфазного характера течения на эффективность вытеснения. Отмечается, что при вытеснении нефти и водой, и газом число параметров подобия удваивается, а эффективность водогазового воздействия оценивается по чистой приведенной стоимости.

Показано, что фазовые превращения при закачке газа перед закачкой воды могут изменить ее направление течения на последующих стадиях разработки месторождения.

**Новизна** полученных в диссертации результатов состоит в установлении закономерностей взаимного влияния совокупности отмеченных выше факторов на эффективность вытеснения нефти при различных способах воздействия на нефтяной пласт. Проведённый в диссертации обзор литературы подтверждает тот факт, что ранее другими авторами эти закономерности не рассматривались. Были выделены критерии подобия для математической модели поставленной задачи, позволившие в ряде случаев получить обоснованные упрощения уравнений и повысить эффективность численных алгоритмов.

Можно отметить, что результаты исследований, полученные в диссертации Черновой Анны Александровны, представляются важными с точки зрения фундаментальной науки как развитие теории многофазной фильтрации, сопровождаемой фазовыми переходами.

**Практическая значимость** результатов исследований связана с установлением степени значимости определяющих факторов, влияющих на добычу нефти и с обоснованием рекомендаций для определения последовательности технологических операций, объёмов реагентов, закачиваемых в пласт, и выводами анализа стратегий закачки, необходимых для принятия решений в технологических циклах добычи нефти.

Имеются некоторые замечания и вопросы к диссертационному исследованию:

1. При формулировке пункта «Цели и задачи работы» не вполне корректно начинать со слов «*Основной целью данной работы является исследование ...*». Любое исследование не должно являться самоцелью, оно служит для достижения определенных результатов.

2. На Рисунке 1.1 диссертации показаны неоднородные распределения пористости и горизонтальной компоненты проницаемости, но в приведённых в диссертации расчётах содержатся только постоянные по заданному направлению значения компонентов тензора проницаемостей. Возможно ли проведение расчётов по представленной математической модели с переменными по какому-либо направлению компонентами тензора проницаемостей с адекватно интерпретируемыми результатами?
3. При растворении закачиваемой в пласт углекислоты вязкость нефти может заметно меняться. Но в расчётах вязкость принимается постоянной. С чем связано допущение о постоянстве вязкости?
4. В разделе «Методы исследования» говорится о применении градиентных и безградиентных методов оптимизации для поиска оптимальных параметров водогазового воздействия. Желательно пояснить, в каких конкретно задачах применялся тот или иной метод и в чём состояло преимущество применения именно его.
5. Применение углекислоты для увеличения коэффициента извлечения нефти неоспоримо и ещё раз продемонстрировано исследованиями автора. При постановке задач в диссертации считается, что углекислый газ подаётся готовым в резервуарах. Можно ли говорить при этом о каком-либо природоохранном значении закачки его в пласт, если его требуется сначала уловить и доставить на месторождение, что сопряжено с дополнительными расходами?
6. Известно, что большинство параметров математических моделей фильтрации в диссертации чувствительны к изменению температуры. Признавая достаточность объёма проведённых исследований и общего числа достигнутых результатов, считаю целесообразным пожелать автору продолжить исследования с учётом температурных зависимостей параметров и соответствующих эффектов.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Диссертационная работа Анны Александровны Черновой представляет собой достаточно глубокое теоретическое исследование, результаты которого непосредственно имеют отношение не только к решению технических проблем увеличения нефтеотдачи пласта, но и к организации процессов нефтедобычи, их экономической эффективности и целесообразности. Каждое из положений, выносимых на защиту, является результатом большого труда и могло бы быть достаточным для одной диссертации.

Материалы диссертации опубликованы в достаточном количестве высокорейтинговых научных журналов и прошли всестороннюю апробацию на многочисленных международных и российских конференциях и конкурсах.

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.

Автореферат составлен в соответствии с установленными требованиями и полностью отражает содержание диссертационной работы.

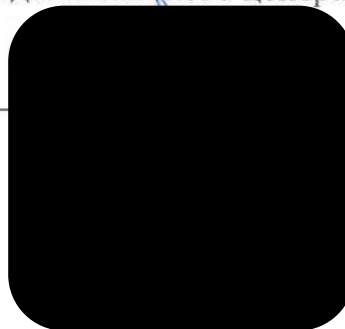
Таким образом, соискатель Чернова Анна Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-

математических наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий лабораторией «Механика многофазных сред»  
Института механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного  
подразделения Федерального государственного бюджетного научного  
учреждения Уфимского федерального исследовательского центра  
Российской академии наук

УРМАНЧЕЕВ Саид Федорович



Контактные данные:

тел.: [REDACTED], e-mail: [said52@mail.ru](mailto:said52@mail.ru)

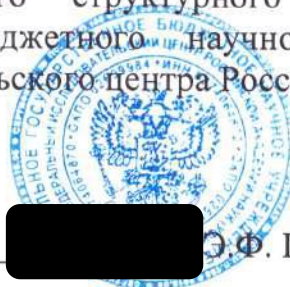
Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Адрес места работы:

Россия, 450054, г. Уфа, Проспект Октября, 71,  
Институт механики им. Р.Р. Мавлютова – обособленное структурное  
подразделение Федерального государственного бюджетного научного  
учреждения Уфимского федерального исследовательского центра  
Российской академии наук, лаборатория «Механика многофазных сред»  
Тел.: +7-347-235-52-55; e-mail: [imran@anrb.ru](mailto:imran@anrb.ru)

Подпись доктора физико-математических наук, профессора, заведующего  
лабораторией «Механика многофазных сред» Института механики  
им. Р.Р. Мавлютова – обособленного структурного подразделения  
Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии  
наук С.Ф. Урманчеева удостоверяю.



Учёный секретарь, к.ф.-м.н.:



Э.Ф. Гайнуллина