

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Давлетбаева Альфреда Ядгаровича «Неизотермическая фильтрация углеводородов в низкопроницаемых коллекторах с трещиной гидроразрыва пласта при электромагнитном воздействии», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.01.09. «Механика жидкости, газа и плазмы».

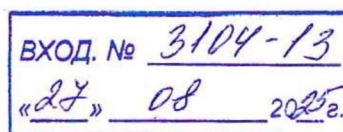
Рецензируемая диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы, включающего 213 наименований. Изложена на 234 страницах, содержит 61 рисунок и 15 таблиц.

Актуальность темы диссертационной работы

Современное состояние нефтедобывающей отрасли характеризуется переходом на разработку, так называемых, трудно-извлекаемых запасов углеводородов, а также широким внедрением новых методов и технологий их добычи. Сложившаяся ранее теория разработки месторождений нефти и газа соответственно требует пересмотра традиционных подходов к проектированию, прогнозу добычи. В свою очередь пересмотр традиционных представлений о разработке должен базироваться на новых физико-математических моделях, учитывающих как новые методы добычи, так и расширение физических эффектов, лежащих в основе моделирования процессов подземной термо-гидродинамики. Немаловажная роль в этом процессе лежит и на расширение экспериментальной исследовательской базы.

Примеры такого совершенствования физико-математических моделей приведены автором в первой главе. Это учет сложной реологии высоковязких нефтей, массовых явлений автоГРП при заводнении низкопроницаемых коллекторов, применения технологий теплового воздействия на залежи вязких нефтей с высоким содержанием асфальтенов, битумов и пр. К сожалению, в первой главе, на взгляд оппонента, часто анализ результатов, полученных исследователями ранее, подменяется лишь обзором задач, которые решались этими исследователями.

Рассмотрен отечественный промысловый опыт применения высокочастотного электромагнитного (ВЧ ЭМ) облучения породы с целью



нагрева пластовой нефти и повышения дебита скважин, что представляет большой практический и научный интерес. Как правильно утверждает автор, глубина проникновения ВЧ ЭМ в пласт определяется частотой облучения и выбор частоты позволяет поставить ряд интересных оптимизационных задач с критерием максимального повышения дебита или максимального нагрева нефти. Однако, значение частоты указано лишь в одном случае, автор делает упор на мощность излучения в анализируемых промысловых испытаниях.

В целом задачи, поставленные автором для исследования, безусловно являются актуальными, так как они совпадают с трендом повышения роли экспериментального и математического моделирования в анализе новых подходов к разработке месторождений углеводородов и, в первую очередь, трудноизвлекаемых запасов. Забегая вперед, оппонент подтверждает, что результаты исследований, полученные автором, безусловно являются вкладом в развитие теории подземной термо-гидродинамики и являются актуальными в современной повестке научных разработок в этой области механики.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна.

К объекту диссертационных исследований можно отнести пористую среду, насыщенную нефтью, разбуренную вертикальными и горизонтальными скважинами, при наличии трещин гидроразрыва пласта как созданных с применением соответствующих технологий, так и техногенного характера (автоГРП). Рассматриваются как изотермические задачи гидродинамики или вытеснения нефти закачиваемой водой, так и не изотермические, связанные с нагревом насыщенной пористой среды с помощью высокочастотного облучения. В основе моделей рассмотренных процессов лежат уравнения сохранения масс фаз в пористой среде и обобщенный закон Дарси для ньютоновских и пластических (с начальным градиентом сдвига) жидкостей. Попутно отметим, что в работе не хватает ссылок на исследования задач фильтрации пластических жидкостей, полученных Баренблаттом, Ентовым в прошлом веке и представленным в их монографиях. Дополняет гидродинамическую модель уравнение притока тепла для насыщенной пористой среды в приближении локального термодинамического равновесия (однотемпературная модель). Гидродинамическая и тепловая модели связаны через зависимость вязкости или реологических свойств нефти от температуры. Отметим, что, на взгляд оппонента, в диссертации автору не хватает четкости в изложении вопросов вывода

уравнения притока тепла в условиях локального термодинамического равновесия фаз.

Новым элементом является включение в рассмотрение в уравнении притока тепла работы массовых пондермоторных сил, являющихся следствием ВЧ ЭМ облучения среды через скважины. Выражение для данного типа работы взято из публикации Абернетти 1976г., в котором зависимость выделяемой теплоты от расстояния до излучающего объекта разбивается на ближнюю и дальнюю области. Физика данного разбиения осталась за полями диссертации. К сожалению, оппонент так и не понял из текста работы как учитывается теплообмен между диэлектриком – нефтью и не диэлектриком – матрицей пористой среды. По мнению оппонента выражение для работы пондермоторных сил должно содержать коэффициент, равный объемной доле нефти в коллекторе.

Решение двух- и трехмерных задач со столь сложной постановкой требует применения численных методов. Автор для консервативной формы уравнений предложил численную схему решения, показал ее устойчивость и доказал сходимость на примере известных задач, что характеризует его как высококвалифицированного специалиста в области численной гидродинамики.

Первый цикл решенных задач относится к анализу с использованием гидродинамических методов исследования скважин влияния техногенных трещин в двух близлежащих скважинах. Изучено влияние импульсов давления в одной скважине на отклик давления в другой (метод гидропрослушивания) в случае однонаправленных, но раздельных трещин и при единой трещине, соединяющей скважины. При анализе поведения скважинного давления автор делает выводы на основе решения прямых задач, но в основе гидродинамических методов определения пластовых свойств коллектора лежат методы решения обратных задач. Это не умаляет заслуги автора в анализе рассмотренной проблемы, но ограничивает практические возможности использования полученных результатов на практике.

Не ясен принцип автора в разделении на главы, но разделы второй главы 2.1, 2.2 почему то называются второй главой, а раздел 2.3 – третьей. Следуя терминологии автора во второй главе рассматриваются задачи ВЧ ЭМ нагрева призабойной зоны вокруг вертикальной скважины. Ранее другими

авторами предлагалось использование циклической технологии ВЧ ЭМ воздействия, в которой периоды нагрева чередуются с периодами эксплуатации скважины без теплового воздействия. Именно такая технология применялась в опытно-промышленных работах на Юлтимировском битумном месторождении. Наибольший практический интерес при применении такой технологии представляют исследования влияния интенсивности ВЧ ЭМ облучения, длительность периодов теплового воздействия и его отсутствия.

Автор в начале исследования показал, что данные о температуре в стволе скважины удовлетворительно воспроизводятся при расчетах по предложенной автором однофазной модели течения нефти в призабойной зоне пласта и скважине. Это указывает на валидацию разработанной модели и разностной схемы для численных расчетов.

Далее автор усложнил термогидродинамическую модель ВЧ ЭМ воздействия на скважину с одной закрепленной трещиной ГРП и двумя разнонаправленными трещинами. При этом ввел в модель тепловое расширение жидкости в уравнение пьезопроводности и адиабатический эффект в уравнение притока тепла. Отметим, что адиабатический эффект фактически является не только допущением о зависимости внутренней энергии от температуры и плотности, но и о зависимости энтальпии от температуры и давления. Последнее приводит к следствию о необходимости также учета эффекта Джоуля Томсона или проведения дополнительных оценок, указывающих на допустимость пренебрежения им.

Нетривиальным выводом исследований автора в разделе влияния теплового расширения констатируется увеличение добычи на 20%, а в разделе о адиабатическом эффекте отсутствие его заметного влияния.

В этой же части работы автор подробно анализирует влияние воздействия на температуру в трещине, приток жидкости вдоль нее и суммарный в скважину, что безусловно представляет научный интерес, но практическая сторона вопроса о рекомендациях по совершенствованию технологии (периодов циклического воздействия, интенсивности, размеров трещины) осталась за рамками исследования. При анализе влияния размеров трещины на процесс автор вводит термин «короткая» трещина. По мнению оппонента это критериальный термин, который должен определяться безразмерными параметрами. К недочетам оформления работы относится и ссылки в таблицах этих разделов на формулу (3.5), которая отсутствует в работе.

В главе 3 автор приводит результаты численных исследований влияния нелинейной реологии нефти на ее приток в вертикальную скважину, скважину с ГРП и в элементе регулярной системы расположения скважин с ГРП. В этой главе автор решает подобные приведенным ранее задачам, но с более сложными граничными условиями, которые учитывают работу скважин окружения при регулярной сетке расположения скважин. Помимо очевидных эффектов, обнаруженных автором, оппоненту интересным показался вывод о зоне влияния нелинейной реологии при воздействии ВЧ ЭМ, которая составляет 10м. По мнению оппонента было бы интересно проанализировать аналитически общие уравнения для выявления безразмерного критерия влияния зоны заметного ВЧ ЭМ воздействия.

Последняя глава рецензируемой работы посвящена исследованию влияния комбинированного воздействия циклического ЭМ нагрева насыщенной пористой среды с закачкой растворителя. На основе подробного анализа результатов лабораторных исследований других авторов в работе предлагается несколько вариантов технологии добычи высоковязкой нефти. Для обоснования рассмотренных вариантов и выбора наилучшего предложена математическая однофазная термогидродинамическая модель, в которую введено уравнение распространения концентрации растворителя (растворитель представляет из себя углеводородную фазу с добавкой растворителя, влияющего на теплофизические свойства углеводородной фазы и ее вязкость). Здесь необходимо отметить, что закачка маловязкого растворителя в пласт с высоковязкой нефтью является неустойчивым процессом, проводящем к формированию переходной зоны пальце (языко) - образования. Теория этих процессов разработана в работах Сафмана-Тейлора, Лонгенрхейма, Краснова и др. К сожалению эти процессы сложно анализировать численно в силу вероятностного характера процесса и зависимости от размеров, ориентации расчетной сетки.

Расчеты показали, что наилучшим по добыче нефти оказался вариант с циклическим воздействием, в котором закачка растворителя сопровождается ВЧ ЭМ нагревом через скважину с ГРП. Одновременное воздействие обеспечивает более глубокое проникновение тепла и растворителя в пласт.

В заключении хочется отметить ясные и четкие выводы сформулированные автором по результатам проведенных исследований.

Практическая значимость работы и степень внедрения результатов исследований.

Разработанные математические модели и результаты исследований позволяют оценить вклад однофазной неизотермической нелинейной по реологии фильтрации, адиабатического эффекта, термического расширения нефти, объемных тепловых источников на процессы тепло- и массопереноса высоковязкой нефти в низкопроницаемом пласте с трещиной гидроразрыва при ВЧ ЭМ воздействии.

Полученные результаты могут быть применены при оптимизации разновидностей электромагнитного воздействия на коллекторы высоковязкой нефти при различных схемах заканчивания скважин, а также использованы для оценки энергетической и экономической эффективности при комбинированном воздействии высокочастотным электромагнитным полем, закачке растворителя и гидроразрыве пласта.

Апробация и публикации. Материалы диссертационной работы докладывались на двадцати трех академических и прикладных международных, одиннадцати всероссийских съездах, симпозиумах и конференциях. По теме диссертации опубликовано 41 научная статья, в том числе 11 в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science, 8 в рецензируемых научных изданиях, входящих в наукометрическую базу RSCI, 4 – из перечня ВАК РФ, 1 монография. Получено 7 патентов.

Общие замечания по диссертационной работе.

1. Пондермоторные силы в насыщенной пористой среде воздействуют только на диэлектрики, т.е. нефть, поэтому работа этих сил в уравнении притока тепла должна быть пропорциональна объемному содержанию нефти в пористой среде.
2. При электромагнитном воздействии из скважины задача является радиальной, а выделяемое тепло зависит от радиуса по экспоненциальному закону. В этом случае для критериев максимального нагрева нефти или максимальной величине добытой нефти существует оптимальная частота используемого поля. Такие задачи сформулированы и решены для ряда подобных задач. К сожалению, в работе не рассмотрено влияние частоты на характеристики процесса.
3. В третьей главе вводится понятие короткой трещины. Для использования таких терминов должен быть представлен анализ безразмерных параметров модели

как системы уравнений с выделением безразмерных чисел, определяющих соотношения характерных величин рассматриваемого процесса.

4. При циклических технологиях воздействия наиболее важными параметрами процесса являются длительности периодов, их соотношение. В работе такие исследования сводятся к расчетам для двух-трех значений, не позволяющих сделать какие-либо определенные выводы. В то время как длительность ВЧ ЭМ воздействия определяется глубиной прогрева среды, длительность добычи - количеством прогретой нефти за период нагрева и т.п., т.е. существуют оптимальные значения этих величин.
5. В работе много огрехов оформления: вторая глава перегружена текстовой и содержательной составляющими, в то время как остальные главы посвящены менее объемным исследованиям; разделы второй главы называются главами, по каким-то разделам написаны выводы, названные выводами по главе; в таблицах главы 3 указаны ссылки на формулу (3.5), которой нет в тексте; двухзначная нумерация рисунков и таблиц соседствует с трехзначной, много литературных ссылок не соответствуют общепринятым [название журнала, год] и невозможно определить статью в списке, и т.п.

Общее заключение. Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, изложены достаточно подробно, стиль изложения не вызывает проблем с их пониманием. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание. Оценивая диссертацию в целом, можно отметить, что постановки задач четкие и полные, анализ результатов не всегда отличается глубиной, но окончательные выводы тщательно продуманы и полностью отражают научную и практическую составляющие. Диссертация представляет собой завершенное исследование, содержащее научно-обоснованные постановки термогидродинамических задач подземной гидродинамики, новые решения актуальных практических задач, разработку новых элементов численных методов, обоснованные и достоверные научные и практически значимые результаты. Сделанные замечания не снижают оценки работы.

Вышеизложенное позволяет заключить, что диссертационная работа соответствует всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Содержание диссертации соответствует

паспорту специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы, физико-математические науки.

Считаю, что Давлетбаев Альфред Ядгарович заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

Профессор Школы естественных наук

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет»,

доктор физико-математических наук

по специальности 01.02.05 – Механика жидкости,

газа и плазмы, профессор

Константин Михайлович Федоров

«06» августа 2025 года

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Константин Михайлович Федоров

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет».

625003, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6.

Тел: (3452) 59-74-29. E-mail:ceo@utmn.ru

Подпись Константина Михайловича Федорова заверяю:

