

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Кряжева Я.А. на тему «Моделирование устойчивости процесса неизотермического вытеснения нефти», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы. Тема диссертации является актуальной для нефтегазодобывающей отрасли России и мира в целом. Истощение традиционных запасов легкой нефти приводит к увеличению интереса к разработке трудноизвлекаемых запасов, в частности высоковязких нефтей. Одной из основных проблем их разработки методами заводнения и теплового воздействия является неустойчивость фронта вытеснения, которая приводит к образованию «языков» вытесняющей фазы, что резко снижает коэффициент извлечения нефти из-за возникновения преждевременных прорывов. В связи с этим разработка методик и критериев для прогнозирования и управления устойчивостью фронта вытеснения имеет высокую научную и практическую значимость, что в полной мере соответствует приоритетным направлениям развития энергетики и повышения эффективности добычи углеводородов.

Цель работы, сформулированная соискателем, заключается в разработке методики исследования устойчивости процессов изотермического и неизотермического вытеснения нефти высокоподвижным флюидом. Данная цель четко определяет направление исследований и достигается путем последовательного решения пяти сформулированных задач, охватывающих как изотермический, так и более сложный неизотермический случай.

Научная новизна работы сформулирована четко и подтверждается материалами диссертации. К наиболее существенным результатам,

Уфимский университет науки и технологий		
Вх. №	1140-13	
« 24 »	03	20 25 г.

определяющим новизну, можно отнести: разработку комплекса критериев для анализа устойчивости фронта вытеснения в изотермическом приближении с учетом гравитационных и капиллярных сил, создание трехфазной двухкомпонентной физико-математической модели неизотермического вытеснения нефти пароводяной смесью, использующей современные уравнения состояния (Лихачева-Фогельсона), а также выявление нового безразмерного комплекса подобия A , характеризующего отношение тепловых потерь к скорости подвода тепла, и установление его влияния на время начала неустойчивого «языкообразования».

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов и обоснованность выводов обеспечивается корректным использованием фундаментальных законов механики многофазных сред и термодинамики при построении физико-математических моделей. Применение строгого математического аппарата в сочетании с критериальным анализом подтверждает внутреннюю непротиворечивость предложенных решений. Высокая степень достоверности также подтверждается согласованием результатов численного моделирования, выполненного по авторским программам, с данными, полученными при помощи коммерческого симулятора («ТНавигатор»).

В первой главе диссертационного исследования представлен качественный аналитический обзор литературы. Соискатель систематизировал современные представления о проблеме неустойчивого вытеснения, методах разработки высоковязких нефтей, а также подходах к моделированию на микро- и макроуровне.

Глава демонстрирует глубокое понимание предметной области и служит основой для постановки собственных исследований. Вывод главы говорит об отсутствии единой методики анализа устойчивости с учетом всего комплекса сил и температурных эффектов, что четко обосновывает необходимость проведенных в диссертации исследований

Во второй главе решается фундаментальная задача по исследованию устойчивости в изотермическом приближении. Математическая модель процесса фильтрации нефти и воды в поле гравитационных и капиллярных сил построена корректно с учетом введенных допущений.

Наиболее ценным результатом главы является вывод критической скорости фильтрации, ниже которой фронт вытеснения остается устойчивым даже при превышении отношения подвижностей флюидов равного единице.

Также в качестве сильной стороны работы можно отметить последующий анализ влияния смачиваемости породы и температуры нефти (через изменение вязкости нефти) на введенные критические числа. Было показано, что при переходе от гидрофильной породы к гидрофобной диапазон вязкости нефти, для которой не возникает неустойчивости, сокращается, а при увеличении температуры нефти, система стремится в область устойчивого вытеснения.

Третья глава посвящена построению более сложной, трехфазной неизотермической модели фильтрации нефти, пара и воды. Приведены основные уравнения сохранения массы, импульса и энергии для фаз. Выбор уравнений состояния и замыкающих соотношений является допустимым.

Процедура обезразмеривания проведена тщательно, что позволило сократить число параметров и выявить ключевой критерий подобия A , который определяет отношение интенсивности тепловых потерь в кровлю и подошву пласта к скорости подвода тепла в насыщенную пористую среду с теплоносителем. Построенная модель является теоретической основой для численных исследований, изложенных в следующей главе.

В четвертой главе представлен алгоритм численного решения поставленной задачи и проведен комплекс расчетов. Важным

результатом является установление зависимости времени начала «языкообразования» от критерия A .

Полученная логарифмическая корреляция имеет высокую практическую ценность для быстрой оценки эффективности процесса паротеплового воздействия без проведения трудоемких полномасштабных расчетов. Верификация модели, за счет сравнения ее результатов с результатами, полученными с помощью промышленного симулятора подтверждают ее адекватность.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в модификации подхода Баклея-Леверетта за счет учета гравитационных и капиллярных сил и в развитии теории неизотермической фильтрации путем построения комплексной трёхфазной модели, которая позволила выявить определяющие критерии подобия.

Практическая значимость состоит в:

- разработке методики критериального анализа, которая позволяет определять параметры закачки вытесняющего агента в пласт для предотвращения преждевременных прорывов при заводнении;
- выявлении безразмерного числа A , позволяющего прогнозировать время начала неустойчивости при паротепловом воздействии, что важно для проектирования и оптимизации таких процессов.

Список литературы состоит из 110 работ, охватывающих как фундаментальные, так и современные исследования в области анализа и моделирования неустойчивого вытеснения нефти. При этом в них входит 8 работ соискателя, опубликованные в ведущих отраслевых и академических рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных.

Замечания по диссертации:

1. Во всех моделях работы рассматривается изотропная пористая среда. Однако для пластов, содержащий высоковязкую нефть,

характерна выраженная анизотропия, которая влияет на направление развития «языков».

2. Неустойчивость Саффмана-Тейлора имеет случайный характер и сильно зависит от макронеоднородности пласта и структуры расчетной сетки. Не приводит ли использование детерминированного критерия к недооценке рисков преждевременного прорыва в реальных, сильно неоднородных коллекторах?

3. Критерий A , представленный в работе, связывает скорость подвода тепла и интенсивность тепловых потерь. Его практическое применение требует пояснения. Ведь для расчета A необходимо знать коэффициент теплопередачи α , который сам по себе является сложным параметром, зависящим от множества факторов (толщина, свойства кровли/подошвы, наличие трещин) и крайне трудно определяемым на практике.

Заключение. Диссертационная работа Кряжева Ярослава Александровича является законченным самостоятельным научным исследованием, в котором решена важная научная проблема, имеющая существенное значение для нефтегазовой отрасли. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, являются обоснованными и достоверными. Соискатель продемонстрировал глубокие теоретические знания и владение современным математическим аппаратом. Выдвинутые автором положения о научной новизне защищаемого исследования нашли свое подтверждение в материалах диссертации. Результаты работы обладают несомненной научной и практической значимостью. Опубликованные автором работы охватывают основные положения, выносимые на защиту, работа соответствует пунктам 1, 6, 7, 8 паспорта специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Таким образом, диссертационная работа Кряжева Ярослава Александровича «Моделирование устойчивости процесса неизотермического вытеснения нефти» полностью удовлетворяет

требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 в действующей редакции), а ее автор Я.А. Кряжев заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук.

Согласен на обработку моих персональных данных, размещение персональных данных и моего отзыва на диссертацию на сайте ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и в Федеральной информационной системе государственной научной аттестации (ФИС ГНА)

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, профессор, заведующий лабораторией математического моделирования процессов фильтрации Института механики и машиностроения – обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

Никифоров Анатолий
Иванович

«5» марта 2026 г.



Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31.

Телефон: +7 (843) 236-52-89, Email: nikiforovimm@mail.ru

Подпись Никифорова Анатолия Ивановича удостоверяю.

