

ОТЗЫВ

официального оппонента

к.ф.-м.н., доц. Киреева Виктора Николаевича

на диссертационную работу Кряжева Ярослава Александровича
«Моделирование устойчивости процесса неизотермического вытеснения
нефти», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая
теплотехника

Актуальность работы. Для разработки месторождений с трудноизвлекаемыми запасами высоковязкой нефти широко применяются методы, основанные на закачке в пласт различных вытесняющих агентов (воды, газа). При этом в зоне контакта вытесняющего агента и нефти может возникать неустойчивость фронта вытеснения и образовываться так называемые «вязкие пальцы» вытесняющей фазы, что приводит к преждевременному прорыву вытесняющего агента к добывающим скважинам и снижению эффективности разработки. Повысить коэффициент извлечения высоковязких нефтей можно путем использования тепловых методов увеличения нефтеотдачи (например, закачка в пласт горячего пара), которые позволяют снизить вязкость нефти. Несмотря на то, что при закачке горячего пара вязкость нефти на фронте вытеснения значительно снижается, может также наблюдаться неустойчивость фронта вытеснения. Таким образом, задача моделирования и управления устойчивостью фронта вытеснения при тепловом воздействии, несомненно, является актуальной.

Диссертационная работа Я.А. Кряжева посвящена моделированию процесса тепломассопереноса в процессе закачки горячего пара в нефтяной пласт для исследования процесса неизотермического вытеснения нефти и выявления критериев возникновения неустойчивости на фронте вытеснения. Полученные в работе результаты позволяют выявить ключевые закономерности, определяющие устойчивость фронта вытеснения, и имеют как научную, так и практическую значимость.

| | | |
|---|---------|----------|
| Уфимский университет науки и технологий | | |
| Вх. № | 1380-13 | |
| « 07 » | 04 | 20 26 г. |

Целью работы является разработка методики исследования устойчивости процессов изотермического и неизотермического вытеснения нефти высокоподвижным флюидом.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в:

1. разработан комплексный критериальный подход к оценке устойчивости фронта вытеснения нефти высокоподвижным флюидом с учетом капиллярных и гравитационных сил;

2. создана физико-математическая модель неизотермической многофазной фильтрации с учётом радиальной симметрии пласта и использованием уравнений состояния Лихачева-Фогельсона;

3. определены безразмерные параметры и новые критерии подобия, характеризующие особенности процессов тепломассопереноса в пористой среде.

Достоверность исследований подтверждается использованием фундаментальных уравнений механики многофазных сред при математическом моделировании рассматриваемых процессов, физической и математической непротиворечивостью в рамках физических законов, а также сравнением полученных результатов с данными других авторов.

Научная и практическая значимость работы заключается в выделении ключевых параметров, влияющих на устойчивость фронта вытеснения нефти и его динамику. Предложен подход, позволяющий учесть влияние капиллярных и гравитационных сил на динамику фронта вытеснения нефти, который позволяет определить параметры флюидов и режима работы скважины без возникновения преждевременных прорывов вытесняющего агента. Разработана физико-математическая модель, позволяющая восстанавливать границы фронта вытеснения нефти при закачке пара в пласт. Выявлен критерий возникновения и эволюции теплового фронта, позволяющий оценить время начала интенсивного пальцеобразования вытесняющей фазы.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору существующих работ в исследуемой области. Были рассмотрены основные

методы разработки месторождений с высоковязкой нефтью (физико-химические и тепловые методы) и их влияние на устойчивость фронта вытеснения. Рассмотрены работы по изучению устойчивости фронта вытеснения, включающие экспериментальные методы и методы численного моделирования на микро- и макроуровне, а также изучены существующие подходы к критериальному анализу устойчивости фронта вытеснения.

На основании литературного обзора был сделан вывод, что в настоящее время не было сформулировано единой методики анализа устойчивости фронта вытеснения нефти высокоподвижным флюидом при рассмотрении непоршневого вытеснения с учетом действия капиллярных и гравитационных сил, а также с учетом температурного воздействия, что является важным при рассмотрении тепловых методов увеличения нефтеотдачи.

Вторая глава посвящена критериальному анализу устойчивости фронта вытеснения нефти водой в изотермическом приближении с учетом гравитационных и капиллярных сил.

В работе формулируется физико-математическая модель двухфазной фильтрации нефти и воды на основании уравнений сохранения массы и импульсов, а также замыкающий уравнений для давлений и насыщенных фаз, после чего производится обезразмеривание системы.

На основании использования введенной физико-математической модели и условия возникновения неустойчивого фронта вытеснения была представлена методика, позволяющая рассчитать критические числа, определяющие тип процесса вытеснения. Было продемонстрировано влияние динамической вязкости нефти, вида относительной фазовых проницаемостей породы при двухфазной фильтрации и температуры вытесняемого углеводорода на эти критические числа

Было показано, что при вытеснении нефти водой в гидрофильной пористой среде при восходящем фильтрационном потоке гравитационные и капиллярные силы препятствуют развитию неустойчивости фронта вытеснения.

Также была проведена валидация разработанной методики, посредством ее сравнения с результатами, полученными в литературе для упрощенного случая при поршневом вытеснении без учета капиллярных сил.

В третьей главе формулируется физико-математическая модель трехфазной неизотермической фильтрации воды, пара и нефти в пористой среде в процессе непрерывной закачки пароводяной смеси в пласт. Приводятся основные уравнения для рассматриваемого процесса, включающие уравнения сохранения массы и импульсов фаз, уравнение сохранения энергии в виде конвективного уравнения теплопереноса, уравнения для относительных фазовых проницаемостей фаз и зависимости плотностей и динамических вязкостей флюидов от термобарических условий.

На основании обезразмеривания полученной физико-математической модели был выявлен новый комплекс подобия, характеризующий отношение интенсивности тепловых потерь в кровлю и подошву пласта к скорости подвода тепла в насыщенную пористую среду с теплоносителем.

В четвертой главе представлен метод определения неизвестных полей давления, температуры и насыщенностей воды, пара и нефти в процессе неизотермической фильтрации, а также проведен анализ результатов расчета.

Был произведен переход от системы безразмерных уравнений трехфазной неизотермической фильтрации в частных производных к системе алгебраических уравнений за счет применения конечно-разностной схемы, после чего был сформулирован алгоритм расчета температурного поля, поля давления и насыщенности фаз в процессе непрерывной закачки пара в пласт.

В работе представлены результаты расчета в зависимости от ранее введенного комплекса подобия, определяющего отношение интенсивности тепловых потерь в кровлю и подошву пласта к скорости подвода тепла в насыщенную пористую среду с теплоносителем.

Анализ результатов позволил получить корреляционную зависимость между временем интенсивного начала образования «языков» вытесняющей фазы от введенного критерия и сделать вывод, что увеличение тепловых потерь приводит к более раннему началу образования «языков» паровой фазы.

Также в рамках работы была проведена верификации разработанной модели посредством сравнения ее результатов с результатами, полученными в специализированном программном обеспечении для гидродинамического моделирования «ТНавигатор» в области температуры и пластового давления, которая показала их хорошее согласование.

Замечания по диссертации:

1. В разделе 2.3 представлена методика определения критической скорости фильтрации U_{cr} , ниже которой не возникает неустойчивости на водонефтяном фронте. Однако расчет этой скорости осуществляется через итерационный процесс. Необходимо пояснить, насколько предлагаемый критерий удобен для оперативного применения в промысловых условиях, где требуется быстрая оценка.

2. Для валидации численной модели неизотермической фильтрации и демонстрации ее прогнозной способности было бы крайне полезно дополнить работу сравнением с данными промысловых экспериментов.

3. Чем был обусловлен выбор уравнения состояния Лихачева-Фогельсона для его использования в физико-математической модели неизотермической фильтрации? В тексте не приведено анализа его преимуществ применительно к моделируемым процессам.

4. В работе в качестве одного из допущений предполагается однородность и изотропность пористой среды. Насколько результаты, полученные для однородной модели, могут быть экстраполированы на неоднородные коллекторы?

Заключение

Представленная работа имеет научную и практическую значимость в области теплофизики и теоретической теплотехники. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации, выводы являются обоснованными и достоверными, работа соответствует пунктам 1, 6, 7, 8 паспорта специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Таким образом, диссертационная работа Ярослава Александровича Кряжева «Моделирование устойчивости процесса

неизотермического вытеснения нефти» полностью соответствует требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842), а ее автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

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:

кандидат физико-математических наук по научной специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, доцент, доцент кафедры прикладной физики Физико-технического института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

Киреев Виктор Николаевич

«07» 04 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»
450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32.
Телефон: +7-917-342-43-01; e-mail: kireevvn@uust.ru

