

## Отзыв

официального оппонента на докторскую диссертацию А.П. Шевелёва «Комплексная методология моделирования процессов тепломассопереноса в приложении к задачам подземной гидромеханики», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

**Актуальность.** Актуальными задачами теплофизики и механики многофазных сред являются вопросы моделирования и расчета неизотермических фильтрационных течений в пористых средах при интенсификации притока нефти за счет теплового и физико-химического воздействия. В последнее время такие методы получили широкое распространение как в России, так и за рубежом. К сожалению, на сегодняшний момент, успешность применения этих методов сравнительно невысокая и напрямую определяется качеством моделирования процессов тепломассопереноса в пористых средах. Выделяются два основных подхода к описанию тепловых и физико-химических процессов в нефтенасыщенных пластах. Первый предполагает детальное многомерное моделирование процесса на основе системы уравнений неизотермической многофазной многокомпонентной механики сплошных сред. Во втором подходе используется упрощенное интегральное описание процесса на основе метода теплового баланса. Подробное моделирование требует существенных временных затрат и задания большого количества характеристик исследуемого объекта. Однако экспериментальные методики определения этой информации не позволяют определить поля указанных параметров во всей моделируемой области. Указанных недостатков лишено упрощенное моделирование процессов тепломассопереноса в пористых средах на основе балансовых соотношений.

В представленной диссертационной работе рассматривается развитие методов упрощенного моделирования этих процессов применительно к

ВХОД. № 1605-13  
«15» 05 2024

задачам пароциклического и парогравитационного дренажа, вопросам устойчивости вытеснения нефти водой, фильтрации вязкопластичной жидкости, процессам водогазового и физико-химического воздействия и проблемам заполнения и блокирования техногенных трещин суспензией. Полученные автором решения позволяют оптимизировать использование этих методов для повышения скорости фильтрационных потоков в пористой среде. Все вышеперечисленное свидетельствует о высокой степени актуальности проведенных в работе исследований.

**Цель работы** – разработка упрощенного комплексного подхода к моделированию задач подземной гидромеханики для получения аналитических и численных решений, описывающих процессы тепломассопереноса в пористых средах.

**Научная новизна** работы состоит:

- в получении разрывных решений с учетом свободной конвекции и без нее в процессе пароциклического дренажа; формулировке физико-математической модели, рассматривающей паровую камеру треугольного сечения с однородным распределением температуры и насыщенных фаз, в рамках интегрального подхода к описанию процесса парогравитационного дренажа;
- в выводе безразмерных критериев, характеризующих устойчивость вытеснения нефти в случаях поршневого и непоршневого вытеснения с учетом гравитационных сил, и влияние предельного градиента давления на скорость потока нефти;
- разработке алгоритма анализа процессов водогазового воздействия путем расчета динамики усредненных в пористой среде насыщенных фаз в специальных фазовых пространствах;

- формулировке метода решения разномасштабных задач тепломассопереноса в процессе выравнивания фильтрационных потоков в слоисто-неоднородных пористых средах;

- разработке новой физико-математической модели, характеризующей особенности массообмена техногенной трещины с пластом.

*Первая глава* посвящена разработке физико-математической модели процесса пароциклического дренажа. На основе анализа современных работ, отражающего актуальное состояние исследований в этом направлении, выделяются нерешенные проблемы моделирования процессов тепломассопереноса при пароциклическом дренаже. Автором проводится критериальный анализ процесса пароциклического дренажа и на его основе формулируются физически обоснованные допущения, учитывающие кусочно-постоянное распределение температуры вблизи скважины на основе подхода Маркса-Лангенхейма. В рамках сформулированных допущений в работе показано, как учет симметрии задачи позволяет снизить размерность решаемых уравнений.

Автором выделены характерные стадии процесса пароциклического дренажа. На основе анализа балансовых соотношений для каждой выделенной автором стадии процесса пароциклического дренажа, вводятся и обосновываются критерии эффективной длительности этих стадий для достижения максимальной массы извлеченного флюида. Автором установлено, что при пароциклическом дренаже с фиксированным расходом нагнетаемого пара рост прогретой области ограничен достижением баланса подводимого и теряемого тепла. Показано, что для процесса пароциклического дренажа время стадии конденсации пара для прогрева скелета пористой среды определяется балансом тепловых потерь и выделяемой в результате конденсации пара теплоты. Определена оптимальная длительность стадии притока флюида из пористой среды при пароциклическом дренаже.

**Вторая глава** отведена разработке физико-математической модели процесса парогравитационного дренажа. Положительной стороной работы является выделение стадий этого процесса на основе анализа современных подходов к моделированию процессов тепломассопереноса. Формулируется интегральная нуль-мерная физико-математическая модель на основе уравнений неизотермической многофазной многокомпонентной фильтрации, позволяющая получить численные решения, применимые для экспресс-оценок эффективности рассматриваемого процесса, и описать траекторию движения каждой точки паровой камеры в процессе ее развития, на основе эмпирического соотношения тепловых потоков Эдмундса-Петерсона. В работе осуществляется переход к безразмерным переменным и выделяются физически обоснованные безразмерные комплексы, характеризующие роль теплофизических свойств пористой среды и флюида и гидродинамических сил в процессе тепломассопереноса. Особо следует отметить, что автором выделены критерии перехода между стадиями процесса парогравитационного дренажа, определяющие их длительность.

На основе валидации разработанной физико-математической модели с помощью сопоставления результатов численного эксперимента с промышленными данными показано, что погрешность моделирования не превышает 12%. Автором:

- установлено существование критического расхода пара, при котором происходит формирование паровой камеры и инициация процесса парогравитационного дренажа;
- определено, что для процесса парогравитационного дренажа ограничение объема прогретой области пористой среды обусловлено достижением баланса подводимого и теряемого тепла.

**Третья глава** содержит разработанный автором метод анализа моделей тепломассопереноса высоковязких флюидов и вязкопластичных жидкостей на основе физико-математического моделирования процессов вытеснения высоковязкой нефти водой и фильтрации неньютоновской жидкости в

пористой среде. В результате анализа экспериментальных работ Саффмана-Тейлора на ячейке Хеле-Шоу и современных подходов к моделированию устойчивости фронта вытеснения флюидов различной вязкости разработана модель такого процесса. В работе получены новые безразмерные критерии, характеризующие устойчивость фронта вытеснения нефти водой и фильтрации вязкопластичной жидкости. Показано, что эти критерии применимы в случаях поршневого и непоршневого вытеснения одного флюида другим.

Положительной стороной работы является переход в безразмерное пространство, в котором получено аналитическое решение уравнения пьезопроводности для вязкопластичной жидкости. На основе этих решений автором определены корреляционные зависимости полученных критериев от управляющих параметров. Подробный анализ разработанных моделей позволил автору установить, что процесс вытеснения высоковязкой нефти водой является устойчивым при скоростях, меньших критического значения, обусловленного превышением гидродинамических сил над гравитационными на порядок; а в начале процесса фильтрации вязкопластичной жидкости влиянием предельного градиента давления на скорость притока флюида можно пренебречь.

*Четвертая глава* посвящена моделированию вытеснения нефти двухфазной системой, состоящей из воды и газа. На основе анализа динамики нескольких фронтов вытеснения одной фазы другой, в течение такого процесса показано, что применение в качестве вытесняющего флюида газа позволяет снизить остаточную нефтенасыщенность за счет уменьшения капиллярных сил, а закачка смеси воды и газа позволяет довытеснить нефть из мелких каналов пористой среды, не промытых водной фазой.

Для уравнений фильтрации трехфазной системы автором выведены безразмерные комплексы подобия и обоснован их физический смысл. Введено понятие области повышенной неопределенности относительной фазовой проницаемости, рассчитанной по различным корреляционным

зависимостям, как области, в которой при одном и том же наборе значений насыщенностей фаз значение относительных фазовых проницаемостей по моделям Стоуна I и Стоуна II отличаются между собой по абсолютному значению более, чем на 10%. Особо следует отметить, что оценка области повышенной неопределенности относительной фазовой проницаемости осуществляется автором посредством перехода в специальные пространства с тернарными диаграммами насыщенностей. В работе вводится оригинальное понятие траектории решения системы уравнений многофазной фильтрации как линии в специальном фазовом пространстве, соответствующей динамике усреднённых насыщенностей фаз в пористой среде для выбранного эффективного соотношения воды и газа. С использованием трехфазного моделирования процесса тепломассопереноса при водогазовом воздействии автором показано, что существование эффективного соотношения воды и газа в нагнетаемой смеси позволяет минимизировать неопределенность получаемых решений на основе алгоритма анализа процесса в специальном фазовом пространстве усреднённых насыщенностей фаз в пористой среде.

*Пятая глава* содержит метод решения разномасштабных задач тепломассопереноса в процессе выравнивания фильтрационных потоков в слоисто-неоднородных пластах. Положительной стороной работы является применение предложенного автором метода на примере перераспределения потоков воды в такой пористой среде за счет физико-химического воздействия вблизи нагнетательной скважины. Автором установлено, что регулирующими параметрами при таком воздействии являются объем закаченного реагента и его концентрация в нагнетаемой смеси.

При моделировании процесса фильтрации раствора полимера в однородной пористой среде в качестве замыкающих соотношений в работе используются изотермы адсорбции У. Генри и И. Ленгмюра, позволяющие замкнуть систему уравнений, описывающую тепломассоперенос химического реагента. Автором выделяются прямая и обратная задачи фильтрации реагента в пористой среде. Получено характеристическое

решение прямой задачи о движении оторочки полимера в пористой среде, позволяющей воспроизвести динамику его концентрации на выходе из образца такой среды. Кроме того, получено решение обратной задачи по восстановлению параметров адсорбции, удерживания и недоступного порового объема без разрушения образцов пористой среды на основе экспериментальных данных по изменению концентрации полимера, прошедшего через нее. Установлено, что в сравнении с экспериментальными данными А.М. Аль-Софи погрешность определения параметров адсорбции и удерживания и недоступного объема пор не превышает 5%.

В работе, для оценки эффективных параметров процесса выравнивания фильтрационных потоков, развивается идея Дж.П. Херцига, А. Ваза, П.Г. Бедриковецкого на случай слоисто-неоднородной пористой среды. В рамках развития этой модели впервые вводится интегральное гидродинамическое сопротивление пористой среды. Определена глубина проникновения реагента в слои неоднородной пористой среды и, на основе сравнения ее характерных значений с масштабами моделируемой задачи, выделены локальная и внешняя расчетные области. В рамках обобщения теории пограничного слоя на задачи подземной гидромеханики получена формула для определения размеров локальной области, решение для распределения концентрации реагента в которой получено методом характеристик. На основе процедуры обезразмеривания системы уравнений физико-химической гидродинамики установлены критерии, характеризующие эффективность моделируемого процесса. Автором показано существование выраженного максимума введенного коэффициента перераспределения потоков, соответствующего балансу между снижением скоростей фильтрации воды по слоям пористой среды и выравниванием фильтрационных потоков.

*Шестая глава* отведена разработке физико-математической модели кольматирования техногенной трещины дисперсными частицами путем закачки суспензии, в основе которой лежат законы сохранения массы фаз,

закон Пуазейля и закон Дарси. Для определения давления в конце техногенной трещины формулируется краевое условие, соответствующее балансу притока и оттока несущей фазы. Разработанная автором модель позволяет учесть два режима работы нагнетательной скважины – с постоянным расходом или постоянным давлением на забое. Для решения поставленной задачи проведено выделение двух задач: движение контактного разрыва концентрации дисперсных частиц к концу трещины и движение фронта кольтматации в виде отраженной волны. Для определения характера массообмена трещины с пластом автором вводится безразмерный критерий, характеризующий отношение проводимостей пористой среды и трещины. Решение первой задачи осуществляется с применением численных процедур, обработка результатов которой позволяет получить корреляционную зависимость концентрации дисперсных частиц от глубины проникновения. Получено аналитическое решение для распределения давления в рамках первой задачи. Решение второй задачи получено в виде квадратур с учетом соотношений на разрыве. Автором показано, что соотношение проводимостей пористой среды и трещины определяет координату начала процесса кольтматации трещины дисперсными частицами.

*Научная и практическая значимость* работы заключается в получении аналитических, полуаналитических и численных решений для определения оптимальных параметров процессов пароциклического и парогравитационного дренажа для увеличения количества флюида, которое может быть извлечено из пористой среды; оценки времени извлечения флюида, в течение которого влиянием предельного градиента давления на скорость притока флюида к добывающей скважине можно пренебречь; прогнозирования эффективного соотношения воды и газа при вытеснении нефти смесью этих флюидов; расчета длины закольтмированной части трещины с высокой точностью на основе решения прямой и обратной задач кольтматации техногенных трещин.



*Список литературы* состоит из 297 источников, содержащих как основополагающие работы в области моделирования тепломассопереноса в пористых средах, так и современные источники, в полной мере отражающие актуальное состояние исследований в области моделирования методов интенсификации притока нефти к добывающим скважинам, из которых 58 – работы автора по данной тематике, опубликованные в ведущих рецензируемых научных и отраслевых журналах.

***Замечания по диссертации:***

1. При моделировании парогравитационного дренажа соотношение тепловых потоков задается эмпирической зависимостью Эдмундса-Петерсона. Возможно ли в рамках предложенного интегрального подхода использовать другую корреляцию для соотношения тепловых потоков?
2. Моделирование фильтрации неньютоновской жидкости осуществляется в цилиндрической системе координат, выбор которой не до конца поясняется в работе.
3. В исследованиях процесса коагулирования техногенной трещины не отображено влияние размера дисперсных частиц на эффективность блокирования части трещины.

***Заключение.***

Представленная для оппонирования работа имеет высокую научную и практическую значимость в области моделирования процессов тепломассопереноса в пористых средах. Диссертационная работа соответствует пунктам 1, 2, 6 и 8 паспорта специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Считаю, что диссертационная работа Александра Павловича Шевелёва «Комплексная методология моделирования процессов тепломассопереноса в приложении к задачам подземной гидромеханики» 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) к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-

математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

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 научный центр Российской академии наук»

Никифоров  
Анатолий  
Иванович

« 6 » мая 2024 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; E-mail: [nikiforovimm@mail.ru](mailto:nikiforovimm@mail.ru)

Подпись Никифорова Анатолия Ивановича удостоверяю:

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).

« 6 » мая 2024 г.