

## ОТЗЫВ

официального оппонента на докторскую диссертацию А.П. Шевелёва «Комплексная методология моделирования процессов теплопереноса 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 темы диссертационной работы.** В настоящее время существенная часть эксплуатируемых месторождений содержит трудноизвлекаемые запасы нефти. Среди таких запасов значительный объем составляют высоковязкие нефти. Их разработка наиболее эффективна с применением тепловых методов увеличения нефтеотдачи (МУН). Предварительное моделирование теплопереноса в ходе таких процессов во многом определяет успешность тепловых МУН.

Сложность моделирования теплофизических задач обусловлена рассмотрением процессов многофазной фильтрации в пористой среде, многомерными тепловыми полями с существенными градиентами температур. Для слабоизученных месторождений и объектов, находящихся на ранней стадии разработки, особую актуальность приобретают подходы к моделированию описанных процессов, базирующиеся на анализе основных закономерностей распространения тепловых полей. Исследования, позволяющие проводить всесторонний анализ теплофизических эффектов в ходе моделируемых процессов, основанные на использовании интегральных балансовых соотношений, дают возможность преодолеть отмеченные сложности. Такие теплофизические исследования, в настоящее время, приобретают первостепенное значение, основополагающая роль которых состоит в получении аналитических решений. Диссертационная работа А.П. Шевелёва посвящена теплофизическим исследованиям процессов теплопереноса в пористой среде, получению аналитических решений, позволяющих сформулировать основные закономерности этих процессов, что имеет как научную, так и практическую актуальность.

**Целью работы** является повышение качества моделирования задач подземной гидромеханики за счёт разработки комплексной методологии моделирования процессов тепломассопереноса.

**Научная новизна диссертационного исследования** изложена в семи пунктах и заключается в формулировке общего комплексного подхода к моделированию процессов тепломассопереноса в задачах подземной гидромеханики, получении аналитических решений для анализа эволюции теплового поля в процессах пароциклического и парогравитационного дренажа, формулировке и обосновании безразмерных критериев, позволяющих выявить и определить условия проявления теплофизических и фильтрационных эффектов, связанных с реализацией тепловых и физико-химических МУН.

**Достоверность** исследований подтверждается использованием фундаментальных уравнений тепломассопереноса, использованием аналитических и численных методов решения прямых и обратных задач, сравнением полученных решений с данными натурных и промышленных экспериментов.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в выделении управляющих параметров процессов неизотермической многокомпонентной фильтрации при наличии фазовых переходов на месторождениях высоковязкой нефти.

Установлены закономерности распространения тепловых полей в процессе парогравитационного и пароциклического дренажа. Разработан математический аппарат, который может применяться для решения практических задач (моделирование тепловых и физико-химических методов интенсификации притока нефти). Предложен метод определения параметров адсорбции и удерживания высокомолекулярных полимеров без разрушения образцов горной породы.

**В первой главе** на основе подробного анализа процесса пароциклического дренажа сформулирована авторская физико-математическая модель и доказано, что описание эволюции теплового поля в рамках разрывных решений позволяет получить аналитические решения

такой задачи. Установлены закономерности формирования стационарного распределения температуры в призабойной зоне скважин при закачке пара. В качестве положительных сторон работы можно отметить выделение основных этапов моделируемого теплофизического процесса. В работе учтено, что при низких скоростях фильтрации пара влияние свободной конвекции проявляется в виде наклонного фронта вытеснения нефти паром. Отмечается, что при высоких скоростях фильтрации пара вынужденные конвективные потоки являются доминирующими. Использование комплексной методологии и интегральной физико-математической модели пароциклического дренажа позволило выявить эффективные управляющие параметры такого воздействия, а также динамику притока флюида. Работу выгодно отличает детальное описание общего подхода к моделированию тепловых и физико-химических методов увеличения нефтеотдачи, сформулированного в виде комплексной методологии моделирования процессов тепломассопереноса в приложении к задачам подземной гидромеханики.

**Вторая глава** посвящена исследованиям в области моделирования процесса парогравитационного дренажа – одной из самых перспективных технологий извлечения сверхвысоковязкой нефти. На основе критериального анализа процесса тепломассопереноса формулируются основные допущения, заложенные в разработанную автором физико-математическую модель парогравитационного дренажа с использованием законов сохранения массы и энергии фаз в паровой камере и элементе разработки в ноль-мерном приближении. Отличительной стороной работы является проведение анализа системы уравнений в безразмерном виде, что позволяет получить универсальные решения, зависящие только от управляющих параметров процесса. Использование процедур асимптотического анализа уравнений модели парогравитационного дренажа позволило выделить условия и критерии перехода между стадиями этого процесса. В работе на основе полученных решений установлено, что главным критерием теплофизической эффективности моделируемого процесса является паронефтяное отношение. Определены характерные

времена стабилизации обводненности продукции добывающих скважин и коэффициента охвата пласта тепловым воздействием.

**В третьей главе** на основе детального анализа процессов устойчивости фронта вытеснения высоковязкой нефти водой или паром отмечается важность решения указанных задач при моделировании процессов тепломассопереноса в пористых средах, насыщенных высоковязкой нефтью.

Автором разработан критериальный метод анализа моделей тепломассопереноса высоковязких флюидов и вязкопластичных жидкостей, который заключается в выделении симметрии процессов, снижении размерности решаемых уравнений, формулировке критериев, характеризующих особенности процесса тепломассопереноса. Предложенный метод подразумевает применение процедуры обезразмеривания основных уравнений, описывающих процессы фильтрации высоковязких и вязкопластичных жидкостей, в случаях поршневого и непоршневого вытеснения нефти водой. Такая процедура позволяет получить новый безразмерный критерий, характеризующий диапазон параметров, при котором моделируемые процессы будут устойчивыми. Доказано, что этот критерий представляет собой безразмерную критическую скорость, при которой достигается максимально возможное значение градиента давления, обеспечивающее сохранение устойчивости вытеснения нефти водой. Получена зависимость сформулированного критерия от соотношения вязкостей вытесняемого и вытесняющего флюидов, которые, в свою очередь, являются функциями температуры и давления. При моделировании процессов фильтрации неньютоновских жидкостей автором получены аналитические решения для динамики безразмерного расхода нефти и вводится критическое время, характеризующее длительность развития процессов перехода от режима фильтрации, описываемой классическими законами, к фильтрации с предельным градиентом давления. В работе показано, что в начале процесса фильтрации влиянием предельного градиента давления на скорость притока флюида можно пренебречь.

**В четвертой главе** описываются основные закономерности процессов вытеснения нефти с применением в качестве вытесняющего агента смеси воды и газа. Показано, что эксперименты по определению относительных фазовых проницаемостей (ОФП) в случае многофазной фильтрации являются немногочисленными и трудоемкими, а различные корреляционные зависимости приводят к наличию области повышенной неопределенности ОФП. В работе формулируется физико-математическая модель вытеснения нефти смесью воды и газа на основе системы уравнений неизотермической многокомпонентной фильтрации. Проведено обезразмеривание уравнений модели и расшифрован физический смысл введенных безразмерных комплексов. Для детального моделирования рассматриваемого процесса в работе приводится подробный алгоритм расчета фазового равновесия многофазной многокомпонентной пластовой углеводородной системы. Автором используется переход в специальные фазовые пространства Гиббса-Розебома для оценки размеров и формы области повышенной неопределенности ОФП. Вводится понятие траектории решения системы уравнений многофазной многокомпонентной фильтрации как линии в специальном фазовом пространстве, соответствующей динамике усреднённых насыщенных фаз в пласте для выбранного оптимального соотношения воды и газа. Проведенное в работе моделирование позволило установить, что при описании процесса вытеснения нефти в случае попадания в эту область прогнозы фильтрационных потоков по разным моделям ОФП расходятся между собой. Доказано, что оптимальное соотношение воды и газа позволяет минимизировать неопределенность получаемых решений.

**В пятой главе** на основе анализа мирового опыта моделирования процессов вытеснения нефти с использованием физико-химических методов интенсификации притока нефти, сформулирована проблема опережающего прорыва воды в пластах со слоистой неоднородностью. Автором спланирован эксперимент по движению оторочки полимера в образце пористой среды без его разрушения, в ходе которого значения параметров адсорбции, удерживания и недоступного порового объема

определяются из решения обратной задачи. В работе получены решения прямой задачи о транспорте оторочки полимера в пористой среде и обратной задачи по определению параметров адсорбции полимера. Установлено, что предложенный метод позволяет более точно определить эти параметры, в отличие от существующих экспериментов, подразумевающих разрушение образцов горной породы для определения адсорбции полимера. По разработанному алгоритму был проведен пример расчетов недоступного порового объема и осуществлено сравнение результатов с экспериментальными данными, опубликованными в научных статьях.

Автором сформулирована новая физико-математическая модель процесса выравнивания фильтрационных потоков, являющаяся развитием модели глубокого проникновения суспензии в пористую среду, авторами которой являются П.Г. Бедриковецкий и Дж.П. Херциг. В модели впервые учитывается слоистая неоднородность фильтрационно-емкостных свойств пористой среды. Отличительной стороной работы является разбиение моделируемой области на две: локальную и внешнюю в рамках аналогии с теорией пограничного слоя. Такое разбиение обосновано проведенными автором оценками глубины проникновения реагента в пласт. На основе метода характеристик автором получены аналитические решения задачи о выравнивании фильтрационных потоков в локальной области слоисто-неоднородной пористой среды. На основе анализа этого процесса сформулированы безразмерные критерии, характеризующие его эффективность. Автором установлено существование оптимального решения, приводящего к максимальному перераспределению потоков слоисто-неоднородной пористой среде.

**В шестой главе** дается характеристика состояния моделирования процессов развития и стабилизации техногенных трещин, на основе современных теорий их формирования и развития. Автором указывается, что возникновение и рост техногенных трещин в пористой среде вблизи нагнетательных скважин приводит к значительно более быстрому потоку воды по трещине, чем по пласту.

Для решения задачи о транспорте суспензии к концу трещины с целью ее блокирования создана физико-математическая модель, учитывающая интегральное балансовое соотношение притока и оттока несущей фазы. При моделировании частичного блокирования этих трещин дисперсными частицами в пористой среде вблизи нагнетательной скважины, на основе разработанной комплексной методологии осуществляется выделение двух задач: транспорт трещины суспензией и блокирование этой трещины дисперсными частицами при движении обратного фронта. С использованием процедуры обезразмеривания системы уравнений транспорта суспензии по трещине автором сформулирован и обоснован безразмерный комплекс, характеризующий особенности массообмена трещины с пластом. Использование численных и аналитических решений позволило определить времена заполнения и частичного блокирования такой трещины.

Проведена валидация разработанной модели путем сопоставления результатов численного исследования с промысловыми данными по одному из месторождений Западной Сибири, показано, что ее точность составляет свыше 95%. Установлено, что для высокопроницаемых пластов возможен режим, когда блокирование трещины начинается с её конца или с середины.

Все аспекты и результаты исследований широко представлены в академических и научно-технических журналах, в тренде современных исследований в области моделирования тепловых и физико-химических методов интенсификации притока нефти, список литературы состоит из 297 работ, из которых 66 – работы автора включая свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, в том числе 42 работы из перечня ВАК РФ.

#### **Замечания по диссертации:**

1. В пункте научная новизна не хватает численных показателей, характеризующих моделируемые процессы (например, какие параметры и как влияют на процесс парогравитационного дренажа, чему равны значения безразмерных критериев, характеризующие устойчивость вытеснения нефти и т.д.).

2. В первой главе приведена валидация физико-математической модели пароциклического дренажа путем сопоставления результатов расчетов с промысловыми данными российских и зарубежных компаний. На взгляд оппонента более показательной является верификация модели путем сравнения результатов моделирования с данными, полученными другими исследователями.
3. В третьей главе при моделировании процесса фильтрации вязкопластичной жидкости правое граничное условие соответствует заданию пластового давления на бесконечном удалении от скважины. Остается неясным, в каких реальных масштабах практических задач можно принимать это допущение.
4. В работе приводятся решения соответствующих практических задач, однако отсутствуют данные о внедрении результатов исследования.
5. Цель работы «повышение качества моделирования задач подземной гидромеханики за счёт разработки комплексной методологии моделирования процессов тепломассопереноса» сформулирована не совсем конкретно. Что подразумевается «комплексностью» методологии, какие подходы конкретно она объединяет.

### **Заключение.**

Представленная работа имеет несомненную научную и практическую значимость в области теплофизики и теоретической теплотехники. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации, работа соответствует пунктам 1, 2, 6 и 8 паспорта специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Таким образом, 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), а ее автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по научным специальностям: 01.04.14 – Теплофизика и молекулярная физика; 04.00.12 – Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, профессор, профессор кафедры геофизики Физико-технического института федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий»

«20» января 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» 450076, Россия, Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

Телефон: +79177555513; E-mail: gframil@inbox.ru

Подпись Шарафутдинова Рамиля Фаизыровича удостоверяю:

Шарафутдинова Р. Р.  
январю «20» 01 2025 г.  
руководителя общего отдела УУИТ  
Шамшибаева Т. Р.

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).

«20» января 2025 г.

Шарафутдинов  
Рамиль  
Фаизырович