

ОТЗЫВ

официального оппонента

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

Актуальность темы. Моделирование процессов теплопереноса в пористых средах применительно к задачам нефтегазового комплекса является актуальной задачей, поскольку позволяет определить эффективные параметры нагнетаемого и добываемого флюида и спрогнозировать их динамику внутри насыщенной пористой среды. Существует класс нетривиальных задач, решение которых в рамках использования коммерческих гидродинамических симуляторов, например, таких, как Schlumberger Eclipse и Petrel, tНавигатор, CMG STARS и ряда других аналогичных по функционалу продуктов, затруднительно или невозможно вовсе, в силу высокой неопределенности входных данных или разномасштабности моделируемых процессов. Общим подходом к решению нестандартных задач является использование принципов теплофизики, механики сплошных сред и многофазных систем для записи основных законов сохранения в трехмерной постановке и применение численных методов для решения полученной системы уравнений.

Для сокращения расчетного времени целесообразным видится подход, развиваемый автором диссертационной работы, заключающийся в выделении характерных размеров и симметрии задачи. Такие упрощения должны быть физически обоснованными, отражать основные особенности происходящих в пористой среде процессов и, в результате анализа результатов моделирования, позволять определить эффективные параметры, необходимые для успешной реализации проводимых мероприятий. Выделение общих подходов, объединение их в единую методологию для последующего моделирования задач теплопереноса в пористых средах позволяет создать универсальный инструмент для решения нетривиальных задач подземной гидромеханики. Именно в этом и заключается суть диссертационной работы

Шевелёва Александра Павловича «Комплексная методология моделирования процессов тепломассопереноса в приложении к задачам подземной гидромеханики».

Цель работы – разработка комплексного подхода к упрощенному моделированию процессов тепломассопереноса за счет снижения размерности, в приложении к задачам подземной гидромеханики.

Научная новизна заключается в формулировке физико-математических моделей пароциклического воздействия, парогравитационного дренажа, вытеснения нефти смесью воды и газа, физико-химического воздействия на слоисто-неоднородную пористую среду и коагулирования техногенной трещины дисперсными частицами на основе комплексного подхода упрощенного моделирования процессов тепломассопереноса.

В первой главе на основе критериального анализа описывается процесс пароциклического воздействия и выделяются характерные стадии, определяемые направлением фильтрационных и тепловых потоков в пористой среде. Использование подходов к физико-математическому моделированию таких процессов, приводящих к снижению размерности решаемых уравнений, объема и требований к качеству входной информации, позволило автору сформулировать подробную математическую постановку задачи о циклической закачке пароводяной смеси в пласт. На основе разработанной физико-математической модели пароциклического дренажа получены аналитические и численные решения, определяющие эффективные длительности выделенных стадий рассматриваемого процесса и интенсификацию динамики притока флюида из пористой среды.

Автором введен и обоснован критерий оптимизации длительности продуктивной стадии процесса пароциклического воздействия как дополнительный объем извлекаемого флюида за счет нагрева нефти, приходящийся на один день цикла пароциклического воздействия.

В работе большое внимание уделено валидации предложенной модели на основе сопоставления расчетных и промысловых информации по

месторождениям Степноозерскому (Россия) и Sho-Vel-Tum (США). Впервые полученные в рамках интегрального подхода решения позволяют с точностью порядка 90% описать процессы тепломассопереноса при пароциклическом воздействии.

В результате проведенных автором в данной главе исследований установлено, что при фиксированном объеме форма прогретой области, определяемая учетом свободной конвекции теплоносителя, несущественно влияет на процесс притока нефти к добывающей скважине; время простоя скважины для прогрева скелета пористой среды определяется балансом тепловых потерь и выделяемой в результате конденсации пара теплоты; при фиксированном расходе нагнетаемого пара рост прогретой области ограничен достижением баланса подводимого и теряемого тепла.

Во второй главе существенным достоинством выполненной автором работы видится детальное описание процессов тепломассопереноса и особенностей их учета в разных подходах к моделированию метода парогравитационного дренажа. На основе анализа пробелов в вопросах моделирования этого процесса, с использованием основополагающих лабораторных экспериментов К.Х. Чанга, выполненных под руководством Р.М. Батлера, интегрального подхода к описанию процесса парогравитационного дренажа и критериального анализа автором диссертационной работы формулируется физико-математическая модель рассматриваемого процесса.

На основе подходов теплофизики получены численные решения для длительности этапа предварительного кондуктивного прогрева насыщенной пористой среды. Сформулирована задача Коши, соответствующая началу формирования термогидродинамической связи между нагнетательной и добывающей скважинами. Из асимптотического анализа уравнений разработанной модели определены условия прекращения роста паровой камеры в пласте. Сформулирован критерий, характеризующий возможность взаимодействия тепловых полей от соседних элементов разработки. С

использованием данных лабораторных экспериментов К.Х. Чанга и промысловых данных по месторождениям Senlac (Канада) и Fengcheng (Китай) проведена валидация разработанной физико-математической модели, позволившая установить, что полученные на ее основе решения воспроизводят динамику извлечения флюида с погрешностью не более 12%.

Автором установлено, что существует минимальный расход пароводяной смеси, при котором начинается формирование паровой камеры; рост паровой камеры обусловлен достижением баланса подводимого и теряемого тепла; прогрев всего пласта возможен в случае, если закачиваемое с пароводяной смесью тепло превысит максимальные тепловые потери, соответствующие началу взаимодействия тепловых полей.

В третьей главе сформулирован критериальный метод анализа моделей тепломассопереноса высоковязких флюидов и вязкопластичных жидкостей. Анализ процессов закачки пароводяной смеси в пласт, насыщенный высоковязкой нефтью, сопровождающихся образованием «языков» прорыва высокоподвижной фазы, позволил установить, что флюиды с невысокими значениями динамической вязкости в низкопроницаемых пористых средах могут проявлять свойства вязкопластичных жидкостей, что осложняет процесс их тепломассопереноса.

Положительной стороной работы является то, что автор объяснил феномен существования предельного градиента давления с точки зрения процессов тепломассопереноса в пористой среде.

На основе разработанного в диссертационном исследовании метода анализа моделей тепломассопереноса высоковязких флюидов и вязкопластичных жидкостей установлено, что скорость притока флюида к скважине во многом определяется распределением давления в пористой среде. Получены аналитические решения уравнений пьезопроводности в случаях ньютоновской и вязкопластичной жидкостей. С использованием разработанного метода сформулирован новый критерий устойчивости вытеснения высоковязкой нефти водой как безразмерная скорость, при

которой процесс вытеснения ещё будет устойчивым. Установлены корреляционные зависимости этого критерия от соотношения вязкостей флюидов. Из решения уравнения пьезопроводности в безразмерном виде получено критическое время, при котором фильтрация вязкопластичной жидкости с достаточной степенью точности ещё описывается классическими законами. На основе полученных аналитических решений показано, что процесс вытеснения высоковязкой нефти водой является устойчивым при скоростях, меньших критического значения, обусловленного превышением гидродинамических сил над гравитационными на порядок; установлено, что в начале процесса фильтрации влиянием предельного градиента давления на скорость притока нефти к добывающей скважине можно пренебречь.

В четвертой главе автором проводится анализ процессов тепломассопереноса применительно к задачам вытеснения нефти смесью воды и газа в специальных фазовых пространствах с тернарными диаграммами насыщенностей Д.У. Гиббса и Х.В.Б. Розебома, позволяющий минимизировать неопределенность получаемых решений таких задач. В работе показано, что применение водогазового воздействия может быть описано только в рамках трехфазной неизотермической модели вытеснения, что сопровождается объективными сложностями в расчете относительных фазовых проницаемостей (ОФП). Существенным преимуществом работы является то, что сформулирован алгоритм композиционного гидродинамического моделирования с введением псевдокомпонента и определением его термодинамических свойств и на его основе получены численные решения уравнений физико-математической неизотермической модели многофазной многокомпонентной фильтрации.

В работе А.П. Шевелёва на основе сравнения результатов решения задачи о фазовом равновесии пластовой системы при различных вариантах объединения высококипящих компонентов в псевдокомпонент установлено, что для моделирования процессов тепломассопереноса при вытеснении нефти

смесью воды и газа достаточно задания 7 углеводородных компонентов: 6 реальных и 1 псевдокомпонента.

В диссертации проведена оценка эффективного соотношения воды и газа в вытесняющем флюиде на основе введения понятия траектории или пути решения системы уравнений многофазной многокомпонентной фильтрации (линии в специальном фазовом пространстве, соответствующей динамике усреднённых насыщенных фаз в пласте).

В данной главе автором показано существование эффективного соотношения воды и газа в нагнетаемой смеси, позволяющего минимизировать неопределенность получаемых решений на основе алгоритма анализа процесса в специальном фазовом пространстве усреднённых насыщенных фаз в пласте.

В пятой главе на основе анализа механизмов физико-химических методов интенсификации притока нефти в слоисто-неоднородных пористых средах в рамках развития концепции глубокого проникновения суспензии в пористую среду сформулирована новая физико-математическая модель такого воздействия.

Существенное внимание в рамках данной главы уделено определению параметров адсорбции и удерживания реагента в пористой среде из решения прямой и обратной задач фильтрации реагента в образцах горной породы. Для получения более точных значений этих параметров автором разработан алгоритм интерпретации параметров адсорбции-удерживания и недоступного порового объёма в изотермическом приближении из экспериментов по фильтрации оторочки полимера через образец пористой среды на основе решения обратной задачи системы уравнений многофазной фильтрации, не требующий, в отличие от существующих экспериментов, деструкции образцов горной породы. Для моделирования задачи о выравнивании фильтрационных потоков в слоисто-неоднородной пластовой системе А.П. Шевелёвым на основе концепции глубокого проникновения реагента в пористую среду Д.П. Херцига и П.Г. Бедриковецкого разработана физико-математическая модель

такого процесса. В работе эта концепция впервые применяется для моделирования процессов тепломассопереноса в слоисто-неоднородной пористой среде. Автором разработан метод разделения многомасштабной задачи тепломассопереноса при выравнивании фильтрационных потоков в слоисто-неоднородной пористой среде на составляющие для получения аналитических решений в локальной области и определения эффективных параметров этого процесса.

В работе, на основе метода характеристик, получены аналитические решения задачи о распределении концентрации реагента в слоисто-неоднородной пористой среде. Полученные автором решения позволили определить, что недоступный поровый объем может достигать 30% от всего порового объема образца керна. В диссертации показано, что закачку реагента можно рассматривать в рамках разделения многомасштабной задачи тепломассопереноса на составляющие, при котором локальная задача описывает распределение концентрации реагента вблизи нагнетательной скважины, а внешняя – перераспределение потоков во всем слоисто-неоднородном пласте.

В шестой главе на основе рассмотрения процесса предотвращения прорыва воды к добывающим скважинам по техногенной трещине за счет ее частичного блокирования суспензионным составом на основе бентонитовой глины разработана новая физико-математическая модель такого процесса с использованием уравнений механики многофазных сред для двухфазной системы, состоящей из дисперсных частиц и несущей жидкой фазы, подверженной утечкам из трещины через ее боковые границы. А.П. Шевелёвым сформулировано краевое условие для определения давления на конце трещины на основе баланса массы несущей фазы, поставлены начальные и граничные условия для получения однозначных решений. Положительной стороной работы является обезразмеривание уравнений физико-математической модели и формулировка нового комплекса, характеризующего особенности тепломассообмена пласта с трещиной.

Автором, на основе полуаналитических решений, получена динамика сокращения эффективной длины трещины автогидроразрыва и проведена валидация модели путем сопоставления этой зависимости с промышленной информацией по одному из месторождений Западной Сибири.

В работе установлено, что для высокопроницаемых пластов возможен режим, когда несущая фаза отфильтровывается в пласт в начале трещины, в то время как пластовый флюид притекает в трещину ближе к ее концу; структура решения задачи о блокировании трещины является следующей: на первом этапе суспензия достигает ее конца, двигаясь с замедлением; на втором этапе формируется отраженная волна в виде разрыва, на котором и происходит блокирование трещины.

Практическая значимость. Разработаны физико-математические модели, получены решения практически важных задач тепломассопереноса в процессах, актуальных для нефтегазового комплекса; созданы методы определения эффективных параметров процессов пароциклического воздействия, парогравитационного дренажа, вытеснения нефти смесью воды и газа и физико-химических методов воздействия на пласт. Предложенные методы позволяют оценивать необходимость применения процессов интенсификации притока флюида для нефтенасыщенных пористых сред со сверхнизкой проницаемостью, насыщенных жидкостями со сложной реологией; определять недоступный поровый объем без разрушения образцов горной породы.

Список литературы состоит из 297 работ, охватывающих как фундаментальные, так и современные исследования, и статьи в области моделирования локальных и внешних задач тепломассопереноса многокомпонентных многофазных систем в пористой среде, из которых 58 составляют работы автора, опубликованные в ведущих отраслевых и академических рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных.

Замечания по диссертации:

1. Недостаточно подробно освещены сложности моделирования локальных задач тепломассопереноса в пористых средах при пароциклическом дренаже с использованием стандартных коммерческих пакетов.
2. В диссертации не освещены проблемы, связанные с возможностью прорыва пара в добывающую скважину при реализации процесса парогравитационного дренажа.
3. В работе не отмечено, возможно ли использовать разработанный алгоритм расчета фазового поведения многокомпонентной углеводородной системы для моделирования других газовых методов увеличения нефтеотдачи.

Заключение. Диссертационная работа Александра Павловича Шевелёва имеет высокую научно-практическую значимость в области решения фундаментальных и прикладных задач теплофизики и теоретической теплотехники. Автореферат не противоречит содержанию диссертации. Опубликованные автором работы охватывают основные положения, выносимые на защиту, 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 А.П. Шевелёв заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Официальный оппонент:

член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук по научной специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, директор Филиала Института машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр нелинейной

волновой механики и технологии Российской академии наук» (НЦ НВМТ РАН)


Ганиев Олег Ривнерович
«27» ноября 2024 г.

Филиал Института машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии Российской академии наук» (НЦ НВМТ РАН), 101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д.4.

Телефон: 8 (499) 135-61-05;

E-mail: sekretar@imash.ru

Подпись Ганиева Олега Ривнеровича заверяю:

Учёный секретарь НЦ НВМТ РАН, к.т.н.




Гранова Г.Н.

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).

«27» ноября 2024 г.


Ганиев Олег Ривнерович