

ОТЗЫВ

официального оппонента на докторскую 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 диссертационного исследования определяется его нацеленностью на решение комплекса задач моделирования процессов теплопереноса в нефте-газонасыщенных пластах с трудноизвлекаемыми запасами и зрелых месторождениях. Внедрение новых технологий увеличения нефтеотдачи таких объектов невозможно без создания математических моделей сложных физико-химических процессов фильтрации многокомпонентных систем для оценки эффективных параметров воздействия. В ряде случаев использование стандартных подходов к моделированию весьма затруднительно в силу высокой неопределенности входных данных или разномасштабности моделируемых процессов.

Решение таких задач, как правило, осуществляется путем выделения определяющих особенностей рассматриваемых процессов и использования основных законов сохранения, принципов теплофизики, механики сплошных сред и многофазных систем. Для снижения неопределенности необходимых исходных данных и сокращения расчетного времени целесообразным видится подход, развиваемый автором диссертационной работы, заключающийся в выделении характерных масштабов 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. Формализация общих подходов, объединение их в единую методологию для последующего моделирования задач тепломассопереноса в пористых средах позволяет создать комплексную технологию решения нетривиальных задач подземной гидромеханики. Именно в этом и состоит суть рассматриваемой диссертационной работы.

Научная новизна заключается в разработке комплексной технологии упрощенного моделирования процессов тепломассопереноса за счет снижения размерности и выделения определяющих параметров в приложении к задачам нефтегазовой подземной гидромеханики и ее использовании для формулировки физико-математических моделей и решения задач пароциклического воздействия, парогравитационного дренажа, вытеснения нефти смесью воды и газа, физико-химического воздействия на слоисто-неоднородную пористую среду и коагулирования техногенной трещины дисперсными частицами.

Степень обоснованности предлагаемых моделей и достоверность полученных результатов определяется использованием классических подходов механики сплошных сред, теплофизики и термодинамики, в частности фундаментальных законов сохранения и общепринятых определяющих уравнений и замыкающих соотношений, а также известных методов решения дифференциальных уравнений и численного моделирования, подтверждается валидацией с данными натуральных и промысловых экспериментов с удовлетворительной точностью.

В первой главе диссертации описан разработанный автором комплексный подход к математическому моделированию процессов тепломассопереноса в нефте-газонасыщенных пластах, позволяющий за счет снижения размерности, выделения определяющих параметров и введения безразмерных критериев, строить упрощенные модели сложных процессов,

требующие меньшего объема входной информации. На основе этого подхода рассмотрен процесс пароциклического воздействия, выделены его характерные стадии, определяемые направлением фильтрационных и тепловых потоков в пласте, разработана математическая модель пароциклического дренажа, получены аналитические и численные решения, позволяющие определить эффективные длительности выделенных стадий процесса и условия интенсификации 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. Выполнена валидация предложенной модели на основе сопоставления расчетных и промысловых данных по двум месторождениям, продемонстрирована точность расчетов порядка 90%.

Установлено, что при фиксированном объеме форма прогретой области независимо от учета 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 работы дано детальное описание процессов тепломассопереноса и особенностей их учета при разных подходах к моделированию метода парогравитационного дренажа, разработана модель формирования паровой камеры в предположении, что ее сечение имеет форму равнобедренного треугольника, получены численные решения для длительности этапа предварительного кондуктивного прогрева насыщенной пористой среды. Поставлена 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. Сопоставление результатов расчетов с экспериментом и промысловыми данными показало удовлетворительное соответствие.

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 проанализированы процессы закачки пароводяной смеси в пласт, насыщенный высоковязкой нефтью, сопровождающиеся прорывом «языков» высокоподвижной фазы. Получены аналитические решения уравнений пьезопроводности в случаях ньютоновской и вязкопластичной жидкостей. Сформулирован 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 использованием треугольных диаграмм насыщенностей. Предложен оригинальный способ снижения влияния неопределенности в задании относительных фазовых проницаемостей трехфазной системы на результаты расчета. Для эффективного использования композиционной модели на основе сравнения результатов решения задачи о фазовом равновесии рассматриваемой пластовой системы при различных вариантах объединения высококипящих компонентов в псевдокомпонент установлено, что для детального моделирования процессов тепломассопереноса при вытеснении нефти смесью воды и газа в данном случае достаточно задания семи углеводородных компонентов: шести реальных и одного псевдокомпонента.

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 насыщенностей фаз в пласте, графически представляемом в виде траектории или пути решения системы уравнений многофазной многокомпонентной фильтрации на треугольной диаграмме насыщенностей.

В пятой главе разработанный автором подход применяется к задаче о выравнивании фильтрационных потоков в слоисто-неоднородном пласте путем закачки оторочки водного раствора адсорбирующейся примеси, продвигаемой водой. Рассматривается однофазная фильтрация по линейному закону, процесс адсорбции предполагается равновесным. С применением теории пограничного слоя строится решение на двух масштабах: внутренняя задача, соответствующая окрестности нагнетательной скважины, решается методом характеристик, а внешняя - численно. Предложен оригинальный критерий количественной оценки эффективности перераспределения потоков.

Существенное внимание в рамках данной главы уделено определению параметров адсорбции и удерживания реагента в потоке из решения прямой и обратной задач фильтрации суспензии в образцах горной породы. Автором

разработан алгоритм интерпретации параметров адсорбции-удерживания и недоступного порового объема в изотермическом приближении из экспериментов по фильтрации оторочки полимера через образец пористой среды на основе решения обратной задачи, не требующий, в отличие от существующих экспериментов, деструкции образцов горной породы. Полученные автором решения позволили определить, что недоступный поровый объем может достигать 30% от всего порового объема образца керна.

В шестой главе на основе рассмотрения процесса предотвращения прорыва воды к добывающим скважинам по техногенной трещине за счет ее частичного блокирования суспензионным составом 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. Сформулировано краевое условие для определения давления на конце трещины на основе баланса массы несущей фазы, поставлены начальные и граничные условия для получения однозначных решений. На основе обезразмеривания уравнений модели введен новый безразмерный комплекс, характеризующего особенности массообмена пласта с трещиной. 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.

В целом, по содержанию диссертации и автореферата имеется *ряд вопросов и замечаний*, не снижающих общей ценности и значимости выполненного исследования:

1. Пункт 6 разработанной автором комплексной методологии предусматривает решение оптимизационных задач. При этом не указано, как следует отыскивать оптимум предложенных критериев: путем проведения многовариантных расчетов или с использованием каких-либо методов оптимизации. (например, рис.9, 7б, 16 автореферата и др.)
2. В диссертации с применением методологии автора рассмотрен ряд классических задач, которым и ранее уделялось большое внимание. В частности, условия устойчивости вытеснения в наклонном пласте были получены И.А. Чарным (например, «Подземная гидрогазодинамика», параграф 7 гл.VII) и имеют схожий вид. В диссертации отсутствуют ссылки на эти работы.
3. Аналогичная ситуация имеет место при рассмотрении фильтрации с предельным градиентом. Необходимо пояснить, в чем преимущества и отличия результатов автора от полученных В.М. Ентовым (см. например, Баренблатт, Ентов, Рыжик «Движение жидкостей и газов в природных пластах», параграф 3 гл. 3).
4. В некоторых местах диссертации имеется путаница в терминологии. Например, при рассмотрении устойчивости вытеснения на стр. 106-107 для случая поршневого вытеснения приведена модель двухфазной фильтрации Баклея – Леверетта, причем уравнение приведено для радиального притока, тогда как далее, судя по всему, речь идет о линейном течении (постоянная скорость, а не расход). Условия устойчивости Саффмана-Тейлора в классической постановке соответствуют случаю течения в горизонтальной плоскости (без учета гравитации), в связи с этим непонятно, как соотносятся соотношения (3.4.10)-(3.4.11) и (3.4.13) в диссертации или (36) и (39) в автореферате.
5. В работе показано, как влияет на устойчивость вытеснения соотношение вязкостей фаз, в том числе и для случая непоршневого

вытеснения, например, рис.106 автореферата. При этом не рассматривается влияние такого важного фактора, как вид фазовых проницаемостей.

6. Следует пояснить систему уравнений (4.2.1)-(4.2.8), где левая часть уравнений сохранения приведена к стандартным условиям с учетом растворимостей R_{og} и R_{go} , а в правую входят мольные концентрации и плотности в пластовых условиях. Что значит «плотность одного моля»?
7. В левой части уравнения (2.3.11) диссертации и (23) автореферата пропущена плотность нефти.
8. Пояснить, почему в работе для определения типа смачиваемости породы используется величина капиллярного числа, которое пропорционально приложенному градиенту давления, то есть зависит от текущей скорости фильтрации (стр.146).
9. Алгоритм, позволяющий минимизировать неопределенность решения задачи о вытеснении нефти смесью воды и газа, использует значения насыщенностей, осредненные по всему пласту. Как они определяются?
- 10.Интересно было бы рассмотреть возможность учета реологии суспензии в задачах, описывающих процессы выравнивания потоков в слоистом пласте и кольматации трещины (главы 5 и 6).
- 11.Валидация модели парогравитационного дренажа выполнена путем сопоставления с промысловыми данными по одному из месторождений США. Почему предполагается, что на промысле были реализованы именно оптимальные параметры воздействия – длительность закачки пара и всего цикла воздействия?
- 12.Недостаточно подробно освещены сложности моделирования задач теплопереноса в пористых средах при пароциклическом дренаже и при водогазовом воздействии с использованием стандартных коммерческих пакетов, а также особенности

последующего перехода к безразмерным переменным для сопоставления с результатами автора. Необходимо выполнить верификацию упрощенных моделей автора путем сопоставления с расчетами, использующими коммерческие симуляторы. К чему приводят упрощения?

13. Интересно было бы более подробно пояснить, как проводятся расчеты по валидации моделей, в частности в главе 6.

Заключение. Диссертационная работа Александра Павловича Шевелёва является завершённым научно-квалификационным исследованием, в котором предложена комплексная методология построения и анализа математических моделей сложных процессов тепломассопереноса, имеющих место при использовании технологий увеличения нефтеизвлечения из месторождений с трудноизвлекаемыми запасами, на ее основе решен ряд задач, имеющих теоретическую ценность и практическую значимость, даны рекомендации по определению эффективных параметров применения пароциклического воздействия, парогравитационного дренажа и ряда других актуальных методов воздействия на пласт, значимых для развития нефтегазовой отрасли.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации и не противоречит ему. Все основные результаты, представленные в диссертации, отражены в 44 публикациях автора в ведущих отраслевых и академических рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных. Разработанные автором модели реализованы в 8 программах для ЭВМ.

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) к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических

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

Официальный оппонент:

доктор технических наук по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, профессор, начальник отдела научно-технического развития и моделирования Акционерного общества «Институт геологии и разработки горючих ископаемых»

Каневская
Регина
Дмитриевна

« 16 » мая 2024 г.

Акционерное общество «Институт геологии и разработки горючих ископаемых» 117312, г. Москва, ул. Вавилова, д. 25, корп. 1.

Телефон: +79859992838; E-mail: KanevskayaRD@igirgi.rosneft.ru

Подпись Каневской Регины Дмитриевны удостоверяю:

Руководитель группы по персоналу и социальным программам
БОРИСОВА Л.С.
Группа по персоналу и социальным программам
МОСКВА

Согласна 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).

« 16 » мая 2024