



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе
ФГБУН «Институт автоматизации
проектирования РАН»,

Н.п.к. РАН, проф., д.ф.-м.н.,
Гущин В.А.

«10» мая 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Гасиловой Ирины Владимировны

«Моделирование диссипативных процессов в пористых средах с газогидратными
отложениями»

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ».

Актуальность. Успех вычислительного эксперимента в любой области знаний определяется развитием в равной мере всех компонент известной триады «модель-алгоритм-программа». В связи с интенсивным внедрением в исследовательскую практику высокопроизводительной вычислительной техники в настоящее время развитию и обновлению численных кодов, применяемых как для фундаментальных, так и для прикладных исследований уделяется особое внимание. Одной из тенденций разработки математических моделей, используемых в современных исследованиях физико-технического характера, является более полный, чем ранее, учет геометрических свойств изучаемых объектов, что достигается использованием сеток нерегулярной структуры, часто называемых неструктурированными. Другой тенденцией является развитие мультифизичности моделей, учет процессов, развивающихся на сильно различающихся пространственно-временных масштабах. Все это приводит к необходимости заниматься новыми типами аппроксимаций, а в плане программирования – осваивать методы объектно-ориентированного и обобщенного программирования. К этому кругу работ относится представленная И.В. Гасиловой диссертация, посвященная разработке разностных схем, алгоритмов и программных средств, которые могут быть использованы для численного анализа разнообразных трехмерных начально-краевых задач флюидодинамики в пористых средах, в частности, содержащих газогидратные включения. В практическом отношении в диссертации развиваются **востребованные в нефтегазовой отрасли новые средства численного решения** задач, возникающих при проектировании технологий разработки залежей углеводородов.

Диссертация посвящена научно-технической проблеме построения математической модели, численной методики и программного обеспечения для моделирования процессов, протекающих при вскрытии продуктивного углеводородного месторождения при наличии газогидратных включений. Результаты расчетов процесса фильтрации углеводородов в значительной степени зависят от качества и достоверности математической модели и ее компьютерной реализации, в частности, от учета фильтрационно-емкостных свойств пористой среды. В работе рассмотрены физически состоятельные модельные задачи, возникающие при моделировании областей депрессии в средах с типами коллекторов, для которых применим закон Дарси в его классической формулировке. Учитывая сказанное, можно сделать вывод, что **представленная работа актуальна.**

Содержание работы. Структура диссертации включает введение, пять глав, заключение и список литературы. Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены направления исследования, цель и основные задачи диссертации, сформулированы основные положения.

В первой главе даются необходимые сведения о природе газовых гидратов и гидратоносных сред с целью определения технологии добычи газа из газовых гидратов, которая станет объектом исследования диссертационной работы.

Вторая глава посвящена математической модели, описывающей процессы тепломассопереноса в пористых средах с газогидратной составляющей. Проводится обзор существующих подходов и обуславливается выбор определенного класса моделей, основанных на балансовых соотношениях. Основное внимание уделено модификации системы известных уравнений механики сплошной среды с целью построения двухблочной модели, где каждый блок отвечает за соответствующий физический процесс, а также исследованию свойств получившихся функциональных блоков.

В третьей главе внимание уделено вычислительному аспекту работы. Подробно описано построение семейства операторно-согласованных разностных схем, специфичных для данной предметной области, которые апробируются в вычислительных экспериментах на известных модельных задачах.

В четвертой главе описывается разработанное с применением современных технологий программирования программное обеспечение для многопроцессорных вычислительных систем.

В пятой главе приведены результаты численного моделирования диссипативных процессов, происходящих в газогидратных пластах при наличии добывающих скважин. Расчеты выполнены в параллельном режиме с помощью разработанных вычислительных алгоритмов и реализованных программных средств. Здесь можно выделить две серии расчетов. Вначале проводится одномерное моделирование сатурационного блока модели, которое подтверждает теоретические выкладки о свойствах поля характеристик данного блока, сделанных во второй главе диссертации. Вторая серия расчетов посвящена трехмерному моделированию термодинамической эволюции параметров системы при различных конфигурациях добывающих скважин.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты, полученные в ходе ее выполнения.

Наиболее существенные результаты, полученные соискателем в диссертационной работе, состоят в следующем:

1. Разработана и исследована двухблочная математическая модель, описывающая термодинамически равновесное многокомпонентное течение в пористой среде с учетом диссоциации газовых гидратов. На основе принципа расщепления по физическим процессам получено основное диссипативное уравнение теории гидратов для давления – уравнение пьезопроводности.

2. Построены и исследованы операторно-согласованные разностные схемы решения начально-краевых задач для уравнений параболического типа на трехмерных неструктурированных сетках общего вида.

3. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенную математическую модель, разностные схемы и вычислительные алгоритмы в виде программных модулей пакета MARPLE (ИПМ им. М.В. Келдыша) для проведения вычислительных экспериментов на многопроцессорных вычислительных системах.

4. С помощью созданных программных средства выполнены вычислительные эксперименты, в которых показано существенное влияние процесса разложения гидратов на динамику изменения давления в пласте.

Новизна результатов диссертации определяется тем, что в ней:

- Разработана новая математическая модель флюидодинамики в пористой среде с учетом диссоциации газовых гидратов, включающая в себя блок с системой гиперболических уравнений относительно водонасыщенности и растепленности на фоне фиксированных скоростей фильтрации, и уравнение пьезопроводности для определения давления в пласте с газогидратными включениями.
- Применительно к геофизическим задачам с разрывными свойствами пласта и разномасштабной структурой коллекторной зоны разработан новый класс операторно-согласованных разностных схем решения начально-краевых задач для уравнений параболического типа на трехмерных неструктурированных сетках общего вида. Свойства схем (порядок аппроксимации, устойчивость, сходимости) установлены в вычислительных экспериментах с модельными постановками задач.
- Создано новое программное обеспечение для моделирования процессов в углеводородных залежах с газогидратными включениями. Оно позволяет численно исследовать физические процессы в трехмерных постановках, в областях со сложной геометрической формой коллекторной зоны, на массивно параллельной вычислительной технике.
- Моделирование с использованием разработанного программного обеспечения позволило получить новые данные по формированию депрессионной воронки в зоне разработки пласта с газогидратными отложениями, в том числе дебет-добычные характеристики кустов скважин. Вычислительные эксперименты на основе новых постановок задач показали существенное влияние процесса разложения гидратов на распределение давления в центральной зоне разработки, что соответствует наблюдаемым свойствам реальных месторождений, в частности, Мессояхского газогидратного месторождения.

Степень достоверности. Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается теоретическими оценками, использованием математически обоснованных численных методов, апробированных на широком классе задач, а также сопоставлением результатов расчетов с имеющимися опытными данными.

Практическая значимость работы состоит в следующем.

1. Расщепление исходной задачи на блоки «пьезопроводности» и «сатурации» позволяет проводить расчеты с достаточно крупным шагом по времени, что открывает возможность создания робастных численных кодов.
2. Разностные уравнения как в блоке пьезопроводности, так и сатурации (в случае его реализации на основе неявной схемы) решаются итерационно, при этом на каждой итерации получаются матрицы меньшей размерности, чем для полной системы соответствующей исходной задачи. Тем самым методика решения задачи становится более экономичной.
3. Методика моделирования диссипативных процессов в месторождениях с газогидратными включениями представляет ценность как ввиду возможности ее объединения в общем коде моделирования диссипативных и сатурационных процессов, так и в силу имеющейся потребности в самостоятельных исследованиях влияния диссипации на пластовые процессы.
4. Разработанный комплекс программ может применяться для расчетов пластовых течений в широком диапазоне свойств среды (пористость, проницаемость, анизотропия). Коэффициенты, характеризующие свойства среды, могут быть сильно неоднородными, а также разрывными.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Разработанный эффективный метод моделирования можно использовать при проведении расчетов течений в осадочных бассейнах с газогидратными включениями с

учетом конкретных фильтрационно-емкостных свойств среды, в том числе для прогноза дебитов углеводородов на залежах с поровым либо трещиновато-пористым типом коллектора.

Созданный комплекс программ с незначительными доработками можно также использовать для изучения других моделей углеводородных месторождений, например, с более сложной, нелинейной зависимостью потоков флюидов от параметров пласта и градиента давления.

Результаты диссертации могут быть использованы в Институте проблем нефти и газа РАН, Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина, Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта, ООО "Газпром ВНИИГАЗ", Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, МФТИ, Сургутском институте нефти и газа, Тюменском индустриальном университете, Новосибирском ГУ, а также в отраслевых исследовательских институтах и лабораториях, занимающихся проблемами математического моделирования углеводородных месторождений.

Замечания по работе.

- 1) Автором не рассмотрены границы применимости модели или возможности применения разработанного программного обеспечения для другого типа месторождения (шельфы, отсутствие-наличие соведного газа в месторождении и т.д.)
- 2) В диссертационной работе предложено новое решение актуальной задачи по устойчивому вычислительному алгоритму. Однако к недостатку работы следует отнести тот факт, что не все тестовые задачи являются многомерными. Например, сатурационный блок можно было бы попытаться рассмотреть в 2D-3D варианте.
- 3) В диссертации создано программное обеспечение для моделирования задач газогидратной тематики на основе операторно-согласованных разностных схем. Однако интересно было бы сравнение, например, аналогичных вычислительных экспериментов при применении конечно-элементного подхода к аппроксимации систем уравнений. Это увеличило бы аргументацию в пользу выбора именно операторно-согласованных разностных схем применительно к данному классу задач.
- 4) В главе 4 недостаточно детально представлена технология распараллеливания расчетной методики, указана только использованная технология MPI.
- 5) Для задач, рассмотренных в главе 5, желательно было бы привести результаты работы программного комплекса на разном числе вычислительных ядер с указанием ускорения и эффективности. В качестве дальнейшего развития предложенной модели желательно провести расчеты совместных задач с учетом работы обоих блоков модели.

Общая оценка работы. Приведенные замечания не меняют общей положительной оценки выполненной диссертационной работы. В работе рассмотрены актуальные научные задачи. Постановка и методики решения задач ясны и обоснованы. Результаты работы обладают научной новизной и практической ценностью. Материал изложен логично и понятно, разделы работы взаимосвязаны. Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.

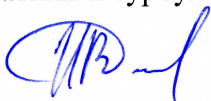
Диссертационная работа Гасиловой И.В. является законченным научным исследованием и соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, удовлетворяет критериям и требованиям абз. 2 п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ» (утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842), а ее автор – Гасилова Ирина Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составлен кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Семеновым И.В.

Отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре ИАП РАН 10 мая 2016 г.

Ведущий научный сотрудник
Отдела вычислительной математики и турбулентности
ИАП РАН,
канд. физ.-мат. наук



/Семенов И.В./

10 мая 2016 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования РАН

123056, г. Москва, ул. 2-ая Брестская, 19/18.

Телефон: 8(499)250-0262, факс: 8(499)250-8928

e-mail: icad@icad.org.ru

www.icad.org.ru