

## О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук  
Кувыркина Георгия Николаевича на диссертационную работу Балашова  
Владислава Александровича «Прямое численное моделирование течения  
жидкости в поровом пространстве пород-коллекторов», представленную  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

В диссертационной работе Балашова В.А. рассмотрены вопросы применения методов математического моделирования к анализу течения жидкости в поровом пространстве пород-коллекторов. В отличие от традиционного подхода, основанного на применении макроскопического закона Дарси, для описания течения в работе использованы уравнения Навье-Стокса (а точнее, их специальная «квазигидродинамическая» модификация), а само течение рассматривается на микроуровне. Рассматриваемые жидкости являются как однофазными однокомпонентными, так и многофазными и многокомпонентными, вязкими, теплопроводными и сжимаемыми. Для описания многофазного случая в диссертации разработана математическая модель типа «диффузной границы», позволяющая учитывать поверхностные эффекты, возникающие на границах раздела фаз. Основу вывода составляет так называемая процедура Колмана-Нолла, так что разработанная модель является термодинамически корректной.

*Актуальность избранной темы.* На сегодняшний день использование математических моделей в процессе оптимизации и анализа процессов разработки нефтегазовых месторождений имеет очень широкое применение. Успешность применения методов математического моделирования в данной области в значительной степени зависит от качества входных данных и достоверности оценки их неопределенности. Стандартным способом определения требуемых параметров являются исследования скважин, исследования образцов керна (горных пород, поднятых из ствола скважины во время бурения) и др. Полученные данные используются для восстановления полей распределений свойств пласта, не противоречащих измерениям, выполненным в масштабах всего месторождения (десятки километров). Однако точность получаемых на основании исследований данных зачастую невысока, особенно для коллекторов со сложной структурой. Таким образом, проблема получения достоверных данных о параметрах пласта, а также оценки степени их неопределенности неизменно остается актуальной.

Физические процессы микроуровня, сопровождающие процесс течения пластовых жидкостей в поровых каналах пород-коллекторов, во многом определяют наблюдаемые макроскопические свойства фильтративных

течений. До некоторых пор единственным источником данных об этих процессах были лабораторные эксперименты на образцах керна. Однако можно выделить ряд недостатков такого подхода: сложность, а иногда и невозможность получения и обработки качественного кернового материала в необходимых количествах; высокая стоимость и практическая невозможность массового применения ряда методик лабораторных исследований; невозпроизводимость в строгом смысле результатов исследований; невозможность воссоздания полного спектра пластовых условий; невозможность проведения полноценных параметрических исследований. Поэтому развитие методик анализа, позволяющих установить особенности процессов вытеснения на микроуровне и их связь с наблюдаемыми макроскопическими характеристиками течения, является актуальной задачей.

Одной из технологий, призванных компенсировать указанные недостатки, является так называемая технология «цифровой керн», в основе которой лежит вычислительный эксперимент. Характерной особенностью такого подхода является детальное разрешение геометрической структуры порового пространства и учет в используемых математических моделях «первичных» физико-химических механизмов, имеющих место на микроуровне.

Развитию подобных технологий (включая математические модели, вычислительные алгоритмы и комплексы программ) посвящена представленная на отзыв диссертационная работа.

**Научная новизна.** Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми. В частности, показана применимость разработанной ранее квазигидродинамической модели для анализа слабосжимаемых течений в микрообразцах горных пород. Разработанный программный комплекс позволяет достаточно эффективно проводить моделирование в микрообразцах горных пород актуальной для промышленных приложений сеточной размерности. Проведены валидация и верификация используемой модели, а также сравнение предлагаемой методики с альтернативной широко распространенной методикой на основе методов решеточных уравнений Больцмана, которые показали эффективность используемых автором диссертации подходов. Применимость разработанной методики и программы иллюстрируется расчетами с использованием реалистичных микрообразцов горных пород.

Разработанная в работе неизотермическая квазигидродинамическая модель течения многофазной многокомпонентной сжимаемой жидкости с учетом поверхностных эффектов является новой. Результаты тестовых двумерных расчетов демонстрируют ее качественную корректность. Разработанная разностная схема легко может быть обобщена на пространственно трехмерный случай. В совокупности это показывает

перспективность применения разработанных подходов в пространственно трехмерном случае.

**Содержание работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и изложена на 108 страницах. Список литературы включает 141 наименование. Текст диссертации является подробным и отражает сущность полученных результатов.

*Во введении* приведен обзор существующих методов и работ по теме диссертации, обоснована актуальность и сформулирована цель исследования.

*В первой главе* сформулированы особенности задач моделирования течений жидкости в поровом пространстве пород-коллекторов. Сформулированы требования, обеспечивающие эффективность соответствующего численного метода и его применимость на практике, обосновывается используемый в дальнейшем подход, основанный на квазигидродинамической системе уравнений. Сформулированы основные достоинства метода, показана его обоснованность с точки зрения физичности результатов моделирования. Стоит отметить, что дополнительные квазигидродинамические слагаемые интерпретируются в работе как физически обоснованные (с точки зрения выполнения свойств консервативности и фундаментальных термодинамических свойств) регуляризаторы, наличие которых позволяет строить логически простые явные разностные схемы.

*Во второй главе* описана используемая геометрическая модель среды, описана используемая разностная схема. Приведено описание параллельного программного комплекса «3dqh», моделирующего течение однофазной однокомпонентной жидкости в поровом пространстве образцов горных пород.

*В третьей главе* приведены результаты моделирования течений однофазной однокомпонентной вязкой слабосжимаемой жидкости как для классических задач гидродинамики (течение в кубической каверне, течение в трубе квадратного сечения, обтекание цилиндра квадратного сечения), так и для задач, специфичных для темы диссертации (определение коэффициента проницаемости образцов модельных пористых сред). Полученные результаты хорошо согласуются с данными, опубликованными в литературе, или аналитическими расчетами.

В этой же главе приведены результаты расчетов течения жидкости в образцах реальных пористых сред. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами расчетов пакетом Palabos, основанном на методе решеточных уравнений Больцмана.

*В четвертой главе* описан феноменологический вывод многофазной многокомпонентной квазигидродинамической системы уравнений, которая учитывает поверхностные эффекты на межфазной границе. В основе вывода лежит концепция микросил и микронапряжений, развитая в работах М. Гуртина в контексте рациональной механики сплошных сред, и так называемая

процедура Колмана-Нолла. Построенная модель относится к классу градиентных (или слабонелокальных) моделей, в которых учитывается зависимость термодинамических потенциалов не только от значений плотности и концентрации, но и от их градиентов. Именно это и позволяет учесть относящиеся к границам раздела фаз поверхностные эффекты без явного выделения непосредственно межфазных границ.

Для полученной системы уравнений описан явный конечно-разностный алгоритм ее решения. В конце главы приведены результаты модельных вычислительных экспериментов: эволюция капли с начальной квадратной формой, слияние двух капель и спонтанный распад однородной возмущенной смеси. Полученные результаты демонстрируют, что построенная система уравнений и разработанный численный алгоритм качественно верно описывают поведение межфазных границ.

*В заключении* приведены основные результаты диссертационной работы.

### ***Степень обоснованности научных положений и выводов***

В основе диссертационной работы лежит квазигидродинамическая модель течения жидкости, которая является достаточно изученной. Валидация разработанного программного обеспечения произведена в серии вычислительных экспериментов. Достоверность и обоснованность полученной модели обеспечена строгостью используемого математического аппарата и приведенными результатами расчетов. Результаты исследования представлены в рецензируемых изданиях, в том числе входящих в Перечень РФ рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

### ***Соответствие содержания диссертации специальности***

Содержание и результаты работы полностью соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, поскольку основными результатами работы являются: математическая модель течения многофазной многокомпонентной жидкости с учетом поверхностных эффектов, явный разностный алгоритм для расчета двумерного двухфазного изотермического течения и параллельный программный комплекс для моделирования вязких неизотермических течений в поровом пространстве образцов горных пород.

### ***Замечания***

Представленная на отзыв работа не свободна от недостатков:

1. Рассмотренные в работе однофазные и многофазные модели позволяют описывать существенно сжимаемые течения, однако в расчетной части

работы рассматриваются исключительно слабосжимаемые течения. Одновременно с этим, анализ существенно сжимаемых течений в рамках прямого моделирования течений в геометрии порового пространства является важной задачей, в частности, связанной с анализом условий, при которых макроскопический закон фильтрации отклоняется от линейного закона Дарси.

2. В работе не обсуждается предельный переход полученной автором модели типа «диффузной границы» к модели «четкой границы» при стремлении к нулю ширины диффузной границы. Такой переход позволяет связать параметры модели диффузной границы и параметры классических соотношений Юнга-Лапласа (т.е. поверхностное натяжение) на границе раздела фаз и может использоваться для идентификации параметров модели диффузной границы. Это сделало бы исследование разработанной математической модели более законченным, как с точки зрения теории, так и с точки зрения практических приложений. Отметим также, что вопросы связанные с идентификацией параметров модели другими способами, автором так же не рассматриваются.
3. В работе приведены результаты двумерных двухфазных расчетов для случая жидкостей с одинаковыми уравнениями состояния и одинаковыми вязкостями, но ничего не сказано про случай жидкостей с существенно отличающимися свойствами. Рассмотрение таких течений более полно показало бы возможности разработанной математической модели и алгоритма. Тем более, что такая ситуация является естественной для многофазных течений в поровом пространстве.
4. В работе рассмотрены простейшие уравнения состояния, область применимости которых весьма ограничена. Целесообразно было бы рассмотреть более сложные уравнения состояния, в частности кубические, простейшим случаем которых является уравнение состояния Ван-дер-Ваальса.

Сделанные замечания не затрагивают основных положений диссертации, выполненной на высоком теоретическом уровне, и не снижают ее научной и теоретической значимости. Автореферат полностью отражает основные положения диссертации и ее содержание.

Диссертация Балашова Владислава Александровича является самостоятельной завершенной научно-исследовательской работой. По актуальности, научному уровню, теоретической и практической значимости она удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям, выполненным по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ, соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент  
Заведующий кафедрой «Прикладная математика» МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
лауреат премии Правительства РФ  
в области науки и техники,  
доктор. технических наук, профессор



08.09.2016г.

Кувыркин  
Георгий Николаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1

Справочная: +7 (499) 263-6391

E-mail: [fn2@bmstu.ru](mailto:fn2@bmstu.ru)



*Подпись завершено*

М. НАЧАЛЬНИКА  
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ  
НАЗАРОВА О. В.  
ТЕЛ. 8-499-263-60-48