



Утверждаю

Директор Федерального государственного
учреждения «Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной математики имени
М.В. Келдыша Российской академии наук»
член-корреспондент РАН



 А. И. Аптекарев
10 января 2017 г.

**Отзыв ведущей организации – ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
на диссертацию Игоря Михайловича Куликова,**

выполненную на тему «Математическое моделирование трехмерных гидродинамических процессов в самосогласованном гравитационном поле на суперЭВМ» на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Фундаментальным теоретическим ядром современной астрофизики является математическое моделирование физических процессов во Вселенной с учетом их влияние на самоорганизацию и эволюцию астрономических объектов, представляющих интерес для науки. Математическая модель эволюции астрономического объекта строится с учетом взаимодействия физических процессов в условиях воздействия гравитационного и магнитного полей. В мире и у нас в стране астрофизическим исследованиям уделяют значительное внимание. В Российской Федерации такие исследования поддерживаются Российской академией наук в рамках государственной программы "Основные положения Основ государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу" (утв. Президентом РФ от 19.04.2013 № ПР-906). Проводимые в рамках диссертации исследования являются частью планов научно-исследовательских работ ИВМиМГ СО РАН, а их выполнение было поддержано большим числом грантов. Поэтому **актуальность** избранной темы и ее связь с планами российской науки и народного хозяйства является несомненной. Необходимо развитие математических моделей гидродинамических процессов с учетом гравитационного поля, разработки вычислительных методов для таких моделей, их

эффективной параллельной реализации на современных суперкомпьютерах, а также комплексные исследования в этой области с помощью вычислительного эксперимента.

Для моделирования астрофизических процессов на больших пространственных и временных масштабах соискателем представлена новая вычислительная гидродинамическая модель, основанная на совместном решении уравнений газовой динамики и уравнений для первых моментов бесстолкновительного уравнения Больцмана. Использование такой модели позволило сформулировать унифицированный численный метод, который эффективно реализован на различных архитектурах суперЭВМ. Продемонстрировано применение такой гидродинамической модели для моделирования взаимодействия и эволюции галактик, образования крупномасштабных космологических структур, а в случае МГД модели – развитие турбулентности межзвездной среды. Дополнительно представлена модель упругопластических деформаций с учетом фазовых переходов (твердое тело/жидкость/газ) и ее применение к задачам «о сварке взрывом» и к ранней стадии столкновения метеоритов с поверхностью планет. Рассматриваемая работа представляет собой законченный научно-исследовательский труд, **новизна исследований** и их **инновационный характер** подтверждается содержанием диссертации, апробацией работы на международных и российских конференциях.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

- Создана новая вычислительная модель упруго-пластических деформаций с учетом переходов (твердое тело/жидкость/газ) для ее применения к задачам о начальной стадии столкновения объектов с поверхностью планет.
- Разработана оригинальная гидродинамическая модель астрофизических объектов. Модель основана на уравнениях магнитной газовой динамики и уравнениях для первых моментов бесстолкновительного уравнения Больцмана. Модель обеспечивает термодинамически согласованное описание процессов фазовых переходов с учетом самогравитации и подсеточных процессов.
- Проведена разработка, верификация и эффективная параллельная реализация вычислительного метода решения входящих в модель систем гиперболических уравнений; метод имеет повышенный порядок точности на гладких решениях и обладает малой диссипацией в области разрывов. Метод основан на комбинации метода разделения операторов, классической схемы С.К. Годунова и кусочно-параболического метода.

- Исследованы гидродинамические процессы на различных пространственных и временных масштабах, включая исследования космологических структур и галактик, молекулярных облаков и межзвездных образований, протопланетных газовых дисков.
- Впервые в мировой науке с помощью термодинамически согласованной гидродинамической модели смоделирован процесс взаимодействия галактик, сценарий свободного прохождения галактик в процессе их центрального столкновения и коллапс молекулярного облака в ходе эволюции межзвездной среды. Экспериментально определены диапазоны гидродинамических параметров, при которых развиваются сценарии взаимодействия галактик (слияния, свободного прохождения и диссипации), обоснованы гипотезы об области повышенной скорости звездообразования за фронтом ударных волн, возникающих при столкновении галактик и об образовании большего числа спиральных рукавов галактики. Исследованы явления при наличии сильного магнитного поля, приводящие к образованию полярных течений при коллапсе молекулярного облака вдоль магнитных силовых линий.
- На основе разработанных вычислительных моделей реализован программный код для моделирования самогравитирующих гидродинамических объектов на гибридных суперкомпьютерах с многоядерными сопроцессорами-ускорителями.

Значимость для науки полученных автором диссертации результатов. На основе достижений в области дифференциальных уравнений, теории разностных схем, параллельных вычислений диссертантом построена и теоретически обоснована математическая модель упругопластических деформаций и термодинамически согласованная гидродинамическая модель астрофизических объектов, разработаны и экспериментально верифицированы оригинальные численные методы высокого порядка точности для математического моделирования самогравитирующих гидродинамических объектов на различных пространственных и временных масштабах, и на этой основе разработано наукоемкое программное обеспечение для современных суперЭВМ. Соискателем разработаны суперкомпьютерные программные комплексы с открытым кодом, которые могут быть использованы в институтах РАН (ИПМ им. М.В. Келдыша, Институт проблем механики, Институт космических исследований, Институт вычислительной математики и математической геофизики, Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова) для моделирования космологических структур.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.

Достоверность и обоснованность обеспечены применением современных математических моделей, проверенных численных методов, сравнением результатов моделирования с лабораторными экспериментами и наблюдениями, наличием высокорейтинговых публикаций и докладов по теме диссертации на международных и российских конференциях и семинарах по теме диссертации.

Апробация результатов исследования. Разработанные в диссертации предложения и рекомендации, изложены в ходе научных семинаров и международных и российских конференций, где соискателем сделано более 10 докладов. Результаты диссертации опубликованы в достаточном количестве статей; опубликовано более 30 работ, из которых 24 опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 275 страниц, включая 97 рисунков, 13 таблиц и список литературы из 281 наименования.

Основное содержание работы.

Во Введении дан обзор и изложено современное состояние математических моделей гидродинамических процессов с учетом самогравитации и численных методов, используемых для их разрешения, а также программных пакетов. Обоснована актуальность и сформулированы цели работы, сформулированы защищаемые научные результаты, дан обзор литературы, выделены: научная новизна, практическая и научная значимость, личный вклад автора, приведена структура диссертации.

В Главе 1 представлена численная модель упруго-пластических деформаций с учетом фазовых переходов. Модель основана на решении уравнений нелинейной теории упругости в лагранжевых координатах. Сформулировано и исследовано уравнение состояния упруго-пластичной среды, описаны правила преобразования уравнения состояния при фазовых переходах. Изложен численный метод решения уравнений, который верифицирован на задаче о распаде разрыва в упругой среде. Приведены результаты вычислительных экспериментов по численному решению задач о скоростном соударении и ранней стадии взаимодействия метеоритов с поверхностью планет.

В Главе 2 представлены математические модели астрономических объектов и подсеточные процессы, необходимые для учета на различных пространственных масштабах. Модель основана на совместном использовании (магнитно) газодинамической

модели и уравнений для первых моментов бесстолкновительного уравнения Больцмана для описания бесстолкновительной компоненты астрономических объектов. Такой подход позволяет сформулировать термодинамически согласованную гидродинамическую модель для описания динамики астрофизических течений.

В Главе 3 описан численный метод решения уравнений гравитационной гидродинамики, проведена его верификация на тестовых задачах и параллельная реализация на различных типах суперЭВМ. В основе лежит метод разделения операторов, в котором исходные уравнения расщепляются на эйлеров и лагранжев этап. На эйлеровом этапе происходит учет работы сил, а на лагранжевом этапе происходит адвективный перенос гидродинамических величин. В основе решения каждого этапа лежит комбинация метода Годунова со специальной модификацией осреднения Рое и кусочно-параболический метода на локальном шаблоне, обеспечивающего высокий порядок точности на гладких решениях и малую диссипацию решения в области разрывов. Геометрическая декомпозиция области используется в основе параллельной реализации.

В Главе 4 описаны результаты моделирования гидродинамических процессов, начиная от крупно-масштабных объектов (космологические структуры), заканчивая объектами масштаба протопланетного диска.

В Заключение диссертации сформулированы основные выводы и основные результаты диссертации.

Диссертация хорошо структурирована, в ней в завершеном виде приведены основные достижения, библиография более чем достаточна, замечаний по оформлению нет. Автореферат содержит основные положения диссертации, все основные результаты опубликованы в научной печати.

В работе отмечены следующие недостатки:

- 1) Эффективность разработанных кодов, реализующих построенную вычислительную модель, не сопоставлена с эффективностью других известных программных продуктов (хотя бы в части отдельных основных вычислительных модулей).
- 2) В диссертации нет данных по масштабированию полнофункционального комплекса программ на разном числе процессоров.

Сделанные замечания не снижают высокую научную оценку работы.

Заключение

Диссертационная работа И.М. Куликова выполнена на высоком научном уровне, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных лично автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых является научным достижением, обеспечившим решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития приоритетных для РФ направлений фундаментальных исследований астрофизических объектов и явлений. Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физ.-мат. наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

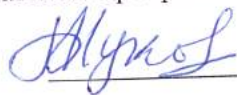
Диссертационная работа И.М. Куликова и отзыв на нее обсуждены и одобрены на расширенном заседании научного семинара Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук", в том числе отдела «Прикладные задачи механики сплошных сред», 22 декабря 2016 года, протокол №1.

Отзыв подготовлен:

зав. отделом «Прикладные задачи механики сплошных сред» Федерального Государственного Учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук»,

доктор физико-математических наук, специальность 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

10 января 2017 г.



Виктор Тимофеевич Жуков

Россия, 125047, Москва, Миусская площадь, д.4
тел.: +7(499) 978-13-14, факс: +7(499)972-07-37
эл. почта: office@keldysh.ru, Web-сайт организации: <http://www.keldysh.ru/>

Подпись В.Т. Жукова заверяю

Учёный секретарь ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, к.ф.-м.н.



/А.И. Маслов/