

«УТВЕРЖДАЮ»

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



20 2 3 г

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша  
Российской академии наук»

Диссертация «Математическое моделирование термомеханических процессов в многофазных средах» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в период обучения соискателем Алексеевым Михаилом Владиславовичем в аспирантуре и дальнейшей работы.

В 2016 г. окончил Московский физико-технический институт по специальности 03.04.01 – прикладные математика и физика. В 2020 г. закончил аспирантуру ИПМ им. М. В. Келдыша РАН по направлению подготовки 09.06.01– информатика и вычислительная техника. В настоящее время работает в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН в должности младшего научного сотрудника.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук Савенков Евгений Борисович работает в должности ведущего научного сотрудника отдела № 11 Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

По итогам обсуждения принято следующее Заключение:

Диссертация Алексева Михаила Владиславовича посвящена решению ряда конкретных задач в рамках разработки, обоснования и применения чисто эйлеровых математических моделей для описания динамики многофазных сред с прямым разрешением межфазных границ, гиперупругим поведением фаз и имеющих вид гиперболических систем уравнений первого порядка. Диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком научном уровне и содержит решение следующих научных задач:

- Выполнен анализ современных методов моделирования многофазных гидродинамических течений с прямым разрешением динамики границ раздела фаз.
- Разработаны математические модели для описания многофазных гидродинамических течений с прямым разрешением динамики границ раздела фаз, в том числе с фазами, имеющими гиперупругое поведение.
- Разработаны вычислительные алгоритмы для решения задач многофазной гидродинамики в рассматриваемом классе постановок.
- Разработанные модели и алгоритмы реализованы в виде параллельного программного комплекса, пригодного для моделирования задач в реалистичных постановках.
- Выполнены валидация и верификация разработанных математических моделей, алгоритмов и их программной реализации.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработанных математических моделях, соответствующих вариантах

алгоритмов разрывного метода Галеркина и параллельной программной реализации, пригодной для анализа задач в реалистичных постановках. Современный уровень развития математического моделирования в области динамики многофазных сред требует учета широкого спектра вопросов, например, термодинамической согласованности разработанных моделей, использования эффективных вычислительных алгоритмов и возможности расчета на пространственных сетках больших размерностей. В диссертационной работе для целого ряда задач в рамках моделей многофазной гиперупругости представлены результаты расчетов, которые согласуются с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными и отражают эффективность представленных подходов. Одним из основных валидационных тестов, представленных в работе, является вычислительный эксперимент взаимодействия ударной волны с пузырьком газа, помещенным в газовую среду с другими термодинамическими параметрами.

Научную новизну работы определяют следующие результаты:

- Новая полностью неравновесная чисто эйлерова математическая модель типа Баера-Нунциато для описания динамики многофазной среды с гиперупругим поведением фаз. Модель характеризуется набором из двух «интерфейсных» скоростей, ее частными случаями являются большинство представленных в литературе сред с шаровым тензором напряжений. Модель является термодинамически согласованной, ее вывод выполнен в рамках методов рациональной термомеханики сплошных сред.
- Новые вычислительные алгоритмы решения уравнений модели типа Баера-Нунциато и модели типа Годунова-Роменского для описания динамики многофазных сред на основе разрывного метода Галеркина с использованием новой многосоставной схемы лимитирования консервативных и простых переменных.
- Параллельная программная реализация разработанных моделей и алгоритмов, пригодной для моделирования многофазных гидродинамических течений и динамики неоднородных сред с

гиперупругим поведением фаз в дискретных постановках актуальных сеточных размерностей.

Математическая модель, вычислительные методы и программная реализация, предложенные Алексеевым Михаилом Владиславовичем, являются эффективным инструментом численного исследования задач динамики многофазных процессов для широкого класса задач. Параллельный программный комплекс, созданный на основе подхода, изложенного в диссертационной работе, состоит из нескольких программных модулей и позволяет получать результаты динамики двухфазных сред в рамках представленных моделей и подходов.

Диссертация соответствует требованиям, установленным в п.п. 9 - 14 Положения «О присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. 8 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям и является законченной научно-квалификационной работой.

Диссертационная работа Алексеева Михаила Владиславовича «Математическое моделирование термомеханических процессов в многофазных средах» соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

- формуле паспорта специальности, так как в диссертации рассматриваются вопросы «разработки фундаментальных основ и применения математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем», а также присутствуют оригинальные результаты одновременно из трех областей: математического моделирования, численных методов и комплексов программ;
- областям исследования паспорта специальности, в частности:
  - пункту «разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»;

- пункту «разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»;
- пункту «реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента».

Результаты, изложенные в диссертации, получены автором лично, являются новыми и представляют научный интерес. Основные результаты диссертации полно отражены в 11 работах. Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и международных баз цитирования:

1. Алексеев М.В. Численное моделирование двухфазных течений в рамках релаксационной модели Баера-Нунциато // Вычислительные методы и программирование. – 2023 (в печати).
2. Полехина Р.Р., Алексеев М.В., Савенков Е.Б. Валидация вычислительного алгоритма на основе разрывного метода Галеркина для релаксационной модели Баера-Нунциато // Дифференциальные уравнения – 2022. – Т. 58. – № 7. – С. 977-994.
3. Алексеев М.В., Савенков Е.Б. Математическая модель двухфазной гиперупругой среды. «Скалярный» случай // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2022. № 40. 63 с.
4. Alekseev M., Savenkov E. Runge–Kutta discontinuous Galerkin method for Baer–Nunziato model with «simple WENO» limiting of conservative variables // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2021. – Vol. 36. – № 2. – pp. 57-74.
5. Тухватуллина Р. Р., Алексеев М. В., Савенков Е. Б. Численное решение уравнений релаксационной модели Баера-Нунциато с помощью разрывного метода Галеркина // Дифференциальные уравнения. – 2021. – Т. 57. – № 7. – С. 988-1002.

6. Алексеев М.В., Савенков Е.Б., Воронин Ф.Н. Численное решение уравнений Баера-Нунциато разрывным методом Галеркина // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2020. – № 48. – 23 с.
7. Alekseev M., Savenkov E. Runge-Kutta discontinuous Galerkin method for hyperbolic hyperelasticity equations for inhomogeneous medium. // *Mathematica Montisnigri*. – 2020. – Vol. 47. – pp. 52–64.
8. Алексеев М.В., Савенков Е.Б. Применение разрывного метода Галеркина для решения одномерных гиперболических задач гиперупругости в неоднородной среде // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2019. – № 88. – 20 с.
9. Алексеев М. В., Савенков Е. Б. Решение нелинейной задачи гиперупругости с использованием разрывного метода Галеркина // *Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах*. – 2018. – С. 21-22.
10. Alekseev M., Savenkov E. Numerical Simulation of Heterogeneous Hyperelastic Model with RKDG // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (2018)* Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (2018). : Springer – 2019. – pp. 295–302.
11. Alekseev M., Savenkov E., Voronin F. RKDG method solution for hyperbolic hyperelastic model // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1141. – p. 12044.

Результаты работы представлены на следующих научных конференциях и семинарах:

1. Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», г. Томск, 1-5 октября 2019 г.
2. Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», г. Томск, 1-5 октября 2018 г.

3. International Conference on Mathematical Modelling in Physical Sciences, г. Москва, 27–31 октября 2018 г.
4. 4-ая Международная научная школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах», г. Москва, 24-26 октября 2018 г.
5. Международная конференция «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященная памяти академика Леонида Ивановича Седова в связи со столетием со дня его рождения, г. Москва, 15 ноября 2017 г.
6. Семинар «Математическое моделирование» под руководством В. Ф. Тишкина и А. А. Кулешова, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва, 17 января 2023 г.

Результаты работы также обсуждались в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша на семинарах «Вычислительные методы и математическое моделирование» им. Ю.П. Попова под руководством проф. М.П. Галанина и проф. В.М. Чечёткина (семинары № 280, 26 декабря 2022 г.; № 259, 27 декабря 2021 г.; № 211, 19 ноября 2018 г.).

Диссертация «Математическое моделирование термомеханических процессов в многофазных средах» Алексеева Михаила Владиславовича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение принято на заседании семинара «Вычислительные методы и математическое моделирование» им. Ю.П. Попова «26» декабря 2022 года.

На заседании присутствовало 23 чел.

Выступили с положительной оценкой диссертации: Галанин М.П., Веденяпин В.В., Меньшов И.С.

Результаты голосования: «за» - 23 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел.

Протокол № 280 от «26» декабря 2022 года.

Руководитель семинара,  
д.ф.-м.н., профессор,  
гл.н.с., и.о. зав. отд. № 11



Галанин М.П.

Секретарь семинара,  
к.ф.-м.н., с.н.с. отд. № 11



Лукин В.В.