

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИПМ им. Келдыша РАН
член-корр РАН доктор физ.-мат. наук
Аптекарев А. И.

"17" 02 2025 г.

Печать организации



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук".

Диссертация «Метод динамической адаптации в численном решении уравнений Бюргерса и Кортевега - де -Вриза и математическом моделировании процессов лазерной фрагментации металлов.» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Быковская Елена Николаевна работала в Федеральном государственном учреждении «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в должности младшего научного сотрудника и программиста (по настоящее время).

В 2015 г. окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» по специальности «Математика». В 2020 г. закончила очную аспирантуру ИПМ им. М.В. Келдыша РАН по направлению подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная техника.

Удостоверение/справка о сдаче кандидатских экзаменов выдано(а) в 2024 г. в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор Мажукин Владимир Иванович работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в должности главного научного сотрудника.

По итогам обсуждения диссертации «Метод динамической адаптации в исследованиях разностных схем для уравнений Бюргерса и Кортевега - де -Вриза и его применение к проблеме импульсной лазерной фрагментации металлов.» **принято следующее заключение:**

Тема диссертации является актуальной, поскольку необходимость разработки новых эффективных методов и подходов решения уравнений математической физики, в частности уравнений Бюргерса и Кортевега- де -Вриза, определяется ростом уровня сложности современных проблем. Для решения этой проблемы используют математическое моделирование физических процессов на ЭВМ неотъемлемой частью которого являются численные методы. Выбор того или иного метода численного решения во многом определяет качество моделирования. Необходимо также иметь в виду, что далеко не безразлично, за счет каких вычислительных затрат достигается конечный результат моделирования. Поэтому вполне естественно на вычислительные алгоритмы наложить требование не только устойчивости, но и вычислительной эффективности и простоты реализации.

В связи с чем, актуальными становятся не только традиционные проблемы повышения точности разностной аппроксимации уравнений, но и методы построения адаптивных расчетных сеток для широкого класса задач математической физики.

Целями и задачами данной диссертации является: дальнейшее развитие методов динамически адаптирующихся сеток на примере решения модельных уравнений Бюргерса и Кортевега -де Вриза;

построение, исследование и сравнение 2-х и 3-х слойных разностных схем записанных в стационарных и подвижных системах координат;

Применение метода динамической адаптации к численному решению прикладной задачи в области лазерной абляции металлической мишени ультракоротким лазерным излучением.

Основные результаты диссертации:

Применение метода динамической адаптации позволяет существенно улучшить качество разностных схем и с одинаковым успехом использовать двухслойные и трёхслойные схемы при решении уравнения Бюргерса. При этом двухслойные схемы позволяют осуществлять интегрирование с меньшими вычислительными затратами.

Применение метода динамической адаптации к решению уравнения Кортевега –де Вриза позволяет избавиться от дисперсии практически во всей области невязности двухслойных схем. Явные схемы при этом остаются абсолютно неустойчивыми. В решении задачи о распространении солитона метод динамической адаптации позволяет производить интегрирование с увеличенным на 2 порядка шагом по времени.

Разработана односкоростная неравновесная двухтемпературная континуальная (гидродинамическая) модель ультракороткого лазерного воздействия на металлическую мишень. С помощью метода динамической адаптации выполнено математическое моделирование задач с произвольным числом подвижных границ и гидродинамических разрывов. Проведено исследование гомогенного и гетерогенного механизмов плавления, и фрагментации металлической мишени (Al) лазерным излучением. Получено качественное совпадение с экспериментальными данными и результатами молекулярно-динамического моделирования процесса лазерной фрагментации металлической мишени (Al).

Разработаны вычислительные алгоритмы и созданы программные комплексы на языке C++ для решения уравнений Бюргерса и Кортевега – де –Вриза и для прикладной задачи лазерной абляции металлов.

Все результаты диссертации получены лично соискателем при научном руководстве Мажукина Владимира Ивановича.

Основным элементом научной новизны является дальнейшее развитие ранее полученных и разработка новых методов и подходов к построению адаптирующихся к решению сеток на примере хорошо известных модельных задач Бюргерса и Кортевега де-Вриза. Впервые в методе динамической адаптации использовались трехслойные разностные схемы для решения уравнения Бюргерса и двухслойные для Кортевега де-Вриза.

Также метод динамической адаптации, позволяющий получать решения задач с произвольным числом подвижных границ и гидродинамических разрывов, был применен к численному решению явлений лазерной абляции металлической мишени ультракоротким лазерным излучением. Построена математическая модель плавления перегретого Al под воздействием fs- лазерного излучения. Кинетика плавления перегретого металла анализируется на основе неравновесной континуальной модели, которая явно связывает гомогенные и гетерогенные механизмы плавления.

Научная и практическая ценность работы.

Все теоретические принципы и подходы, которые были разработаны для модельных уравнений Бюргерса и Кортевега- де -Вриза были использованы в решении прикладной задачи о лазерном воздействии на металлическую мишень. Использование в качестве источника энергии ультракоротких (фемто-пикосекундной длительности) лазерных импульсов открывает новые возможности практического применения процессов фрагментации в областях нано

структурирования, нано металлических покрытий, генерации нано частиц и наноструктур для нужд медицины и биологии и др.

Достоверность и обоснованность результатов.

Обоснованность полученных результатов следует из корректности поставленных задач, использовании стандартных численных методов и использовании классической континуальной модели. Достоверность результатов следует из валидации (согласия с экспериментальными данными) и верификации (сравнения с теоретическими данными) других авторов.

Материалы диссертации полно представлены в работах, опубликованных соискателем.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих рецензируемых научных журналах:

1. V.I. Mazhukin, A.V. Shapranov, **E.N. Bykovskaya**. Comparative analysis of the quality of two- and three-layer difference schemes of the second order. *Mathematica Montisnigri* XLII, pp.31-51, 2018. (WoS, MathSciNet).
2. Mazhukin V.I., Shapranov A.V., **Bykovskaya E.N.** Two-layer finite-difference schemes for the Korteweg-de Vries equation in Euler variables. *Mathematica Montisnigri*. 2020. V. 49. P. 57-69. (WoS, MathSciNet).
3. **Быковская Е.Н.**, Шапранов А.В., Мажукин В.И. Анализ погрешности аппроксимации двухслойных разностных схем для уравнения Кортевега де-Вриза. Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. N 1. P. 17. (РИНЦ).
4. **Быковская Е.Н.** Численное решение уравнения Кортевега-де Вриза на подвижной сетке с использованием двухслойных разностных схем. «Ученые записки физического факультета» Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, №1, 2210702. (Список ВАК)
5. V.I. Mazhukin, M.M. Demin, A.V. Shapranov, **E.N. Bykovskaya**. Continual modeling of processes of homogeterogeneous melting and fragmentation of metal by ultrashort laser pulse. *Mathematica Montisnigri* LVIII, pp.80-93, 2023 (WoS, MathSciNet)

Личный вклад соискателя заключается в том, что все численные исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично автором в процессе его научной деятельности. Материалы из совместных публикаций, использованные в работе, содержат оригинальные результаты автора. Автором были проведены все расчеты и исследования разностных схем с помощью метода динамической адаптации, а также расчеты с применением континуальной модели и выполнена интерпретация полученных данных.

Диссертация «Метод динамической адаптации в исследованиях разностных схем для уравнений Бюргерса и Кортевега - де -Вриза и его применение к проблеме импульсной лазерной фрагментации металлов» Быковской Елены Николаевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 (05.13.18) математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

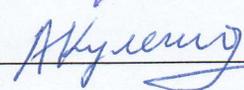
Заключение принято на заседании научного семинара 15-го и 16-го отделов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Присутствовало на заседании 22 чел.

Выступили с положительной оценкой диссертации: Тишкин В.Ф., Кулешов А.А.

Результаты голосования: "за" - 22 чел., "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел., протокол N _ от "16" 05 2024 г. протокол № 2





Тишкин Владимир Федорович
член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. отд. №15
Кулешов Андрей Александрович
д.ф.-м.н., г.н.с. отд. №15