

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный исследователь-
ский ядерный университет
«МИФИ»**

(НИЯУ МИФИ)

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
Тел. (499) 324-77-77, факс (499) 324-21-11
<http://www.mephi.ru>

14.05.2025 № 97-6/25

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио первого проректора федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Национальный
исследовательский ядерный университет
«МИФИ»,
проректор
доктор физико-математических наук,




Н.С. Барбашина
14 мая 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» на диссертационную работу Быковской Елены Николаевны «Метод динамической адаптации в численном решении уравнений Бюргерса и Кортевега-де-Вриза и математическом моделировании процессов лазерной фрагментации металлов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертационная работа Быковской Елены Николаевны посвящена развитию метода динамически адаптирующихся сеток на примере решения модельных уравнений Бюргерса и Кортевега-де Вриза с последующим применением его к численному решению явлений лазерной абляции металлической мишени ультракоротким лазерным излучением.

Актуальность темы исследования и степень её научной разработанности.

Растущая сложность современных научных и технических задач требует создания новых эффективных методик для численного решения уравнений математической физики. На первом этапе часто рассматриваются редуцированные системы уравнений, которые могут упростить разработку численных методов решения и обеспечить их верификацию. Исследование редуцированных моделей (в том числе численными методами) служит также необходимым промежуточным шагом для анализа полных моделей, поскольку позволяет сделать выводы о фундаментальных свойствах решения полной задачи. Уравнения Бюргерса и Кортевега-де Вриза, которые содержат члены, описывающие мелкомасштабные процессы диссипации и дисперсии, являются содержательными математическими моделями и одними из самых простых редуцированных уравнений, у которых формируются решения с узкими высокоградиентными зонами.

При наличии сильной нелинейности расчеты многомасштабных процессов, которые сопровождаются образованием узких высокоградиентных зон, даже в одномерной постановке, требуют больших вычислительных затрат. Снижение этих затрат является актуальной задачей и проводится по нескольким направлениям, одним из которых является использование адаптивных сеток.

Разработанный метод адаптирующихся сеток использован для математического моделирования фрагментации расплава при гетеро-гомогенном плавлении в процессе неравновесной лазерной абляции металла.

Научная новизна исследования заключается в создании и совершенствовании методов построения сеток, адаптирующихся к решению. В качестве модельных задач были выбраны уравнения Бюргерса и Кортевега-де Вриза. Методической новизной обладает применение динамически адаптирующихся сеток к трехслойным разностным схемам для решения уравнения Бюргерса и двухслойным схемам для уравнения Кортевега-де Вриза.

Метод динамической адаптации, способный эффективно работать с задачами, содержащими несколько подвижных границ и гидродинамических разрывов, был применен для моделирования процесса лазерной абляции металлической мишени с использованием ультракороткого лазерного излучения. Была создана математическая модель процесса плавления перегретого алюминия под воздействием фемтосекундного лазерного излучения. Анализ кинетики плавления перегретого металла проводился с помощью неравновесной континуальной модели, которая учитывает как гомогенные, так и гетерогенные механизмы плавления. При этом новизна присутствует как в адаптации метода к системе уравнений, описывающей реальные и сложные физические процессы, происходящие при воздействии лазерного излучения на мишень, так и в результатах, полученных с помощью этого метода.

Теоретическая и практическая ценность исследования.

Полученные результаты могут быть востребованы в области теоретической и прикладной гидродинамики, при решении практических задач. Теоретические подходы, разработанные для решения модельных уравнений, были применены при решении прикладной задачи взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с металлической мишенью (Al).

Применение фемто- и пикосекундных лазерных импульсов в качестве источника энергии создало новые перспективы для практического применения процессов фрагментации. Это особенно актуально для таких областей, как наноструктурирование материалов, создание наноматериалов и металлических покрытий, а также синтез наночастиц и наноструктур для медицинского и биологического применения.

Достоверность и обоснованность.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечена строгостью математического аппарата, корректностью применения апробированных в научной практике аналитических и численных подходов и сопоставлением результатов, полученных с использованием предложенных моделей, с результатами расчетов других авторов, а также с известными экспериментальными данными, обсуждением результатов исследования на всероссийских и международных конференциях, публикацией результатов исследования в рецензируемых научных изданиях, индексируемых как в российских, так и в международных базах данных. Таким образом, для подтверждения достоверности результатов выполнена как их валидация, так и верификация.

Соответствие паспорту специальности ВАК.

Диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности ВАК 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Апробация.

Материалы диссертации докладывались на пяти международных и российских конференциях. По теме диссертации опубликовано 5 работ в изданиях из перечня журналов, рекомендованных ВАК РФ, из которых 3 работы – в изданиях, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus, MathSciNet. Отдельно следует отметить тот положительный факт, что одна из статей опубликована без соавторов.

Личный вклад автора.

Четыре из пяти работ, в которых в полной мере представлены основные результаты диссертации, были написаны в соавторстве с научным руководителем и являются продолжением работ, выполненных ранее руководителем соискателя. В одной работе соискатель является единственным автором. При выступлении на семинаре соискатель продемонстрировала, что разбирается во всех деталях представляемой работы и результаты получены ей лично или при ее непосредственном участии.

Содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, показана степень разработанности по теме исследования, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, охарактеризованы новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, обоснована достоверность и приведена информация об апробации результатов.

Первая глава диссертации посвящена анализу существующих методов построения расчетных сеток. Рассматриваются различные методики: вариационные методы, дифференциальные подходы, технологии адаптивно встраивающихся сеток, алгоритмы динамической адаптации. Подробно обсуждаются методы с автоматическим преобразованием координат. Во второй части главы исследованы разностные схемы для решения уравнений Бюргерса и Кортевега-де Вриза. Для уравнения Кортевега-де Вриза анализируются: метод коллокаций, метод Галеркина, метод конечных элементов, конечно-разностный метод и др. Уравнение Бюргерса используется как для тестирования двухслойных и трёхслойных схем, включая схему Кабаре.

Заключительная часть главы посвящена обзору методов изучения динамической фрагментации металлов. Обсуждаются вопросы оценки геометрических и кинематических свойств образующихся фрагментов. Показано, что эта проблематика имеет важное значение, как для теоретической, так и для практической науки.

Во второй главе свойства (аппроксимация, точность) двух- и трехслойных разностных схем анализируются применительно к уравнению Бюргерса. Рассматриваются варианты таких разностных схем для сеток с фиксированными и подвижными узлами. Исследуемые разностные схемы реализованы с помощью представленных алгоритмов в виде программного кода на языке C++. Показано, что для уравнения Бюргерса использование динамически адаптирующихся сеток позволяет получить результаты хорошего качества как для двухслойных, так и для трехслойных разностных схем. При этом метод динамической адаптации сетки позволяет сохранить хорошую точность решения при изменении коэффициента диссипации на три порядка без существенного увеличения числа узлов разностной сетки. Точность численного решения определялась сравнением с аналитическим решением. Также исследована возможность использования методов монотизации для улучшения качества численного решения.

В третьей главе представлено исследование двухслойных разностных схем для численного решения уравнения Кортевега-де Вриза. Исследовались как явные, так и неявные разностные схемы. Показано, что использование подвижных сеток с динамической адаптацией существенно повышает точность решения без изменения числа узлов разностной сетки и позволяет получить хорошие результаты для семейства двухслойных разностных схем в широком диапазоне изменения коэффициента невязности. Установлено, что это справедливо и для тех схем, которые на неподвижных эйлеровых сетках не позволяют получить приемлемых результатов. Полученные результаты показывают, что использование адаптирующихся подвижных сеток позволяет выполнять расчеты со значительно более высоким шагом по времени. При решении задачи о распространении солитона этот шаг удалось увеличить на два порядка по сравнению со случаем, когда для той же разностной схемы используется неподвижная сетка.

В четвертой главе разработана математическая модель плавления перегретого алюминия под воздействием импульса лазерного излучения фемтосекундной длительности. Для численного решения адаптирован метод перестраивающихся сеток, разработанный в предыдущих главах применительно к уравнениям Бюргерса и Кортевега-де Вриза. Показано, что скорость гомогенного плавления может достигать 20 км/с, что значительно превышает как скорость звука, так и скорость гетерогенного плавления. Разработанный численный метод, реализованный в виде алгоритмов и программного кода, позволил исследовать процессы динамической фрагментации металла, вычислить геометрические характеристики откольных разрушений и получить информацию о режимах, при которых возникают откольные разрушения.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Автореферат соответствует установленным требованиям и полностью отражает основное содержание диссертации.

По содержанию работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. В диссертации не обсуждается возможность адаптации разработанного метода для решения трехмерных задач, для которых метод был бы особенно востребован.
2. Как показано в работе А.К. Волкова и Н.А. Кудряшова (Журнал вычислительной математики и математической физики, 2016, том 56, № 4, с. 685–693) псевдоспектральные методы позволяют получить решения хорошего качества для нелинейных волновых процессов, описываемых обобщенным уравнением Кортевега–де Вриза пятого порядка. Обсуждение этих методов и их недостатков по сравнению с предлагаемым подходом отсутствует.
3. Фундаментальные результаты в области структуры разрывов (узких высокоградиентных зон) были получены академиком Куликовским А.Г. и его коллегами применительно к обобщенному (в смысле нелинейности) уравнению Кортевега-де Вриза-Бюргерса. При этом для подтверждения полученных теоретических и аналитических результатов были успешно выполнены численные расчеты. Уравнения Бюргерса и уравнение Кортевега-де Вриза, рассматриваемые в диссертации, являются частными случаями обобщенного уравнения Кортевега-де Вриза-Бюргерса, которое обладает значительно более богатым множеством решений. Эти работы (их более 20) опубликованы в иностранных журналах квартиля Q1, а также ЖВМиМФ, трудах МИАН и Докладах РАН. Из текста диссертации и выступления на семинаре следует, что эти работы соискателю не знакомы.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

В целом диссертация написана ясным научным языком, хорошо структурирована и оформлена.

Заключение.

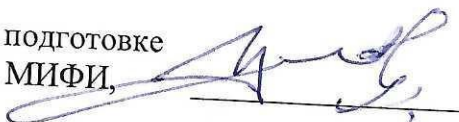
Диссертационная работа Быковской Елены Николаевны является научно-квалификационной работой, которая полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемых ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв ведущей организации обсужден и одобрен на заседании кафедры суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов института лазерных и плазменных технологий 12 мая 2025 года, протокол № 4 от «12» мая 2025 года.

Отзыв подготовил заведующий кафедрой суперкомпьютерного моделирования инженерно-физических процессов Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ д. ф.-м. н.

 В.А. Шаргатов

Председатель совета по аттестации и подготовке научно-педагогических кадров НИЯУ МИФИ, д. ф.-м. н., профессор

 Н.А. Кудряшов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Почтовый адрес: 115409, Москва, Каширское ш., 31
Телефон: +7 495 788 5699, +7 499 324 7777
Адрес электронной почты: info@mephi.ru
Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://mephi.ru/>