

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

**«Национальный исследовательский
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>

08.04.2026 № 02/01-032

На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио ректора федерального
государственного автономного
образовательного учреждения
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»



доктор физико-математических наук,

Н.С. Барбашина

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
на диссертационную работу Кучугова Павла Александровича
«Математическое моделирование процессов при сжатии лазерных термоядерных
мишеней», представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

1. Актуальность избранной темы.

Диссертационная работа посвящена разработке инструментов для математического моделирования задач физики высоких плотностей энергии и, в частности, задач лазерного термоядерного синтеза. Интерес к лазерному термоядерному синтезу появился в середине прошлого столетия, когда появились достаточно мощные лазерные установки, и не снижается в настоящее время, когда на установке NIF (National Ignition Facility, США) достигнуто зажигание лазерной термоядерной мишени. Было поставлено огромное количество разнообразных задач, большая часть которых всё ещё ожидают своего решения. Установки, предназначенные для исследований в области лазерного термоядерного синтеза, создаются также в Китае, Франции и России – установка мегаджоульного уровня энергии в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров). Кроме таких мощных установок, создаются также установки-спутники для исследования частных задач, в России такой установкой является установка ЭЛЬФ в НИЯУ «МИФИ» (г. Москва). Решение задач, связанных с созданием и описанием вещества в экстремальных условиях, в частности, с реализацией управляемого термоядерного синтеза, требует развития соответствующих методов, в том числе, методов математического моделирования, необходимых как для анализа проведённых экспериментов, так и для планирования новых.

Развитие физико-математических моделей различных процессов, соответствующих численным алгоритмам, их реализация в программных комплексах являются основными составляющими последовательного совершенствования численных кодов для исследования практических задач. В представленной работе этот цикл выполнен для таких критически важных процессов при прямом облучении мишеней лазерного термоядерного синтеза, как перенос энергии быстрыми электронами и перемешивание веществ на границах оболочек термоядерной мишени. Полное описание генерации и переноса энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами подразумевает использование кинетиче-

веществ на границах оболочек термоядерной мишени. Полное описание генерации и переноса энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами подразумевает использование кинетического уравнения совместно с уравнениями Максвелла, что с численной точки зрения в масштабах мишени ЛТС представляется нереалистичным без снижения размерности задачи. В этом случае разработка надёжных физико-математических моделей, учитывающих основные особенности процессов в конкретных конструкциях мишеней, актуальна в контексте решения задачи определения влияния быстрых электронов на динамику сжатия мишеней лазерного термоядерного синтеза и мишеней для изучения свойств веществ в экстремальных условиях. Снижению вычислительных затрат и расширению возможностей моделирования соответствует также представленные в диссертационной работе методы для исследования перемешивания веществ в таких мишенях. Здесь также невозможно численное описание турбулентного перемешивания, включающего масштабы течения, начиная с колмогоровского масштаба. Развитие подходов, позволяющих снизить требования к численной сетке, но получать интегральные характеристики процессов, близкие к полученным в расчётах на подробных сетках, представляет значительный научный интерес.

2. Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства.

Тему работы можно отнести к приоритетному направлению Стратегии научно-технологического развития РФ, связанному с переходом к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, и критическим технологиям создания высокоэффективных систем генерации энергии. Реализация реактора на основе лазерного термоядерного синтеза в перспективе позволит получить неисчерпаемый источник чистой энергии. Современные научные исследования опираются как на теоретические разработки, так и на данные натуральных и численных экспериментов, что позволяет обеспечивать их всестороннюю верификацию и повышать достоверность получаемых результатов. Продвижение в любом из этих направлений является значимым для направления в целом.

3. Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

В настоящее время наибольший прогресс в реализации лазерного термоядерного синтеза был достигнут на установке National Ignition Facility (NIF, США) с использованием схемы непрямого облучения термоядерных мишеней, одной из особенностей которой является относительно малое число лазерно-ускоренных быстрых электронов. Иначе дело обстоит в схемах прямого облучения, особенно при использовании излучения с большей длиной волны, где поток лазерно-ускоренных быстрых электронов играет существенную роль в энергетическом балансе, что подтверждается расчётами и соответствующими экспериментами. Рассматриваются различные схемы и геометрии мишени прямого облучения, причём для многих из них прежде не обсуждались особенности распространения быстрых электронов, несмотря на достаточно обширную имеющуюся литературу. В контексте таких исследований, в данной диссертационной работе предложена новая модель, позволяющая определить долю потока быстрых электронов, которые могут влиять на сжатие мишени прямого облучения, имея возможность попасть в центральные сжимаемые области. Естественным развитием этой модели стала оригинальная модель нагрева мишени с учётом особенностей переноса быстрых электронов, учитывающая рассеяние частиц и основные

механизмы торможения, включая торможение в поле обратного тока тепловых электронов. Развитие новых моделей подразумевает разработку новых численных алгоритмов и создание соответствующих программных модулей, что также было проделано в данной работе для описания процесса переноса энергии быстрыми электронами.

С целью реализации возможности многомерного мультифизического моделирования задач физики высоких плотностей энергии был создан новый трёхмерный эйлеров программный комплекс РМ². Его отличительной особенностью является реализация базовой гидродинамической модели на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса. Новым элементом является совместное использование подстраиваемых под характеристики течения параметров подхода, отвечающих за соотношение разрешаемых и неразрешаемых масштабов течения, и учёт связанных с этим коммутационных ошибок оператора осреднения. Для численного решения общей системы уравнений разработан новый вычислительный алгоритм, выполняющий расчёт эволюции параметров подхода.

В численных расчётах при использовании развитых моделей, вычислительных алгоритмов и их программных реализаций, впервые для мишеней прямого облучения, предложенных для использования на российской мегаджоульной лазерной установке, установлены пределы для конверсии лазерной энергии в энергию быстрых электронов и энергии быстрых электронов, допускающие зажигание термоядерного топлива. При облучении плоских мишеней потоком быстрых электронов обоснована возможность генерации ударных волн с гигабарным уровнем давления, предсказанная в работах С.Ю. Гуськова, а также впервые установлены параметры лазерного импульса, необходимые для этого. При облучении плоских мишеней конечной толщины, для которых пробег быстрых электронов существенно превышает их толщину, впервые обоснована возможность создания источников рентгеновского излучения или источника термоядерных нейтронов с удельным нейтронным выходом 10^8 - 10^9 частиц/Дж на квазистационарной стадии нагрева.

Таким образом, новизна работы определяется развитием и численной реализацией физико-математической модели нагрева мишени лазерно-ускоренными быстрыми электронами, в которой учтена геометрия мишени прямого облучения и явление торможения быстрых электронов в поле обратного тока тепловых электронов. Кроме того, впервые для описания турбулентного перемешивания в задачах лазерного термоядерного синтеза была сформулирована и применена математическая модель на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса. В результате развитых методов на основе численного моделирования установлены характеристики потока лазерно-ускоренных быстрых электронов, допускающие зажигание различных типов мишеней ЛТС прямого облучения, а также численно определены параметры мощных ударных волн, индуцированных воздействием потока быстрых электронов при пробеге частиц, существенно меньшем толщины мишени, и параметры источников термоядерных нейтронов и рентгеновского излучения при пробеге частиц, существенно большем толщины мишени.

4. Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов.

В диссертационной работе представлен набор физико-математических моделей, позволяющих описывать нагрев плазмы термоядерной мишени лазерно-ускоренными быстрыми электронами с необходимой аккуратностью для планирования и интерпретации экспериментальных исследований в области физики высоких плотностей энергии как в ударных трубах, так и на лазерных установках, что представляет

практическую ценность для ряда профильных институтов, в частности, РФЯЦ-ВНИИЭФ и РФЯЦ-ВНИИТФ. Теоретическая значимость работы состоит, в частности, в развитии описания таких важнейших для осуществления зажигания при прямом облучении мишеней ЛТС процессов, как перемешивание на границах составных частей мишеней и перенос энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами. В работе получены аналитические оценки и результаты численного моделирования имплозии мишеней ЛТС, а также воздействия потока быстрых электронов на плоские мишени. Разработанные модели включают описание переноса быстрых электронов в сферических мишенях ЛТС, учитывающего особенности генерации частиц при многопучковом облучении мишени, передачи энергии от быстрых электронов с учётом эффекта «блуждания» и торможения в поле обратного тока тепловых электронов, представленные теоретические результаты расширяют применимость классического приближения тормозной способности вещества. Практическая реализация разработанных моделей в виде программных модулей для гидродинамических численных кодов имеет важное значение при решении оптимизационной задачи по подбору конструкций мишеней под заданные параметры лазерной системы. Данные модули были внедрены в пакет прикладных программ, включающий успешно эксплуатируемый в течение нескольких десятилетий в ИПМ одномерный лагранжев численный код ДИАНА и в новый созданный трёхмерный эйлеров код РМ². Базовая гидродинамическая модель трёхмерного программного комплекса сконструирована на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса и позволяет использовать подстраиваемые под характеристики течения параметры модели и учитывать связанные с этим коммутационные ошибки оператора осреднения. Численный алгоритм, реализованный в программном комплексе РМ², представляет отдельную теоретическую ценность.

Также в работе методами математического моделирования решен ряд практически важных задач. Так, определение параметров быстрых электронов, при которых возможно осуществление зажигания при параметрах российской мегаджоульной лазерной установки, напрямую влияет на реализуемость программы по ЛТС. Помимо этого, рассмотрено влияние быстрых электронов на сжатие мишеней ЛТС в схемах ударно-волнового зажигания. Круг решённых задач не ограничивается направлением ЛТС и включает исследование воздействия потока быстрых электронов на плоские мишени. При пробегах быстрых электронов, существенно меньших толщины мишени, такое воздействие способно обеспечить генерацию ударных волн экстремальной интенсивности, что представляет интерес для исследования различных свойств веществ в экстремальных условиях. В случае, если пробег частиц существенно превышает толщину мишени, возможно создание квазистационарных плазменных объектов, которые могут служить источником термоядерных нейтронов или рентгеновского излучения с широким диапазоном энергии квантов.

Созданный трёхмерный программный комплекс в связке с одномерным лагранжевым кодом успешно использовался при выполнении работ в интересах российских федеральных ядерных центров в г. Сарове и в г. Снежинске. Следует отметить, что масштабирование процессов, протекающих в мишенях ЛТС, на другие типы мишеней позволяет решать другие критически важные задачи описания поведения вещества при большой плотности энергии.

Возможность использования гибридного RANS-LES подхода с адаптирующимися параметрами для моделирования турбулентных течений позволяет применять разработанный в диссертации программный комплекс для расчёта течений в ударных и аэродинамических трубах. Использование функционала программного комплекса по совместному моделированию других физических процессов целесообразно в Институте

лазерных и плазменных технологий НИЯУ «МИФИ» в связи со строительством лазерной установки ЭЛЬФ.

5. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.

Развитые в диссертационной работе физико-математические модели в качестве базы используют общепринятые физические приближения и основные физические законы, что обеспечивает непротиворечивость полученных результатов. Реализованные численные алгоритмы основываются на надёжных численных методах, многократно апробированных на широком круге задач. Созданные программные модули и новые программные комплексы верифицированы на известных аналитических решениях и результатах, полученных другими исследователями.

Основные результаты работы были широко представлены на российских и международных научных конференциях, семинарах профильных научных организаций, а именно, по теме диссертации было сделано 14 сообщений в виде секционных и пленарных докладов.

Результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, 15 из которых входит в перечень ВАК, в том числе 6 работ в журналах, входящих в первый квартиль WoS, что подразумевает прохождение процедуры серьёзного всестороннего рецензирования с привлечением 2-3 рецензентов.

6. Оценка содержания диссертации: ее завершенность, достоинства и недостатки диссертации по содержанию и оформлению, замечания по оформлению, мнение о работе в целом.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения полным объёмом 316 страниц и списком литературы из 374 источников. Во Введении обосновывается актуальность проводимых исследований, представлена формулировка целей и задач работы, излагается научная новизна и практическая значимость. В первой главе формулируется и обсуждается базовая физико-математическая модель течения вязкой сжимаемой теплопроводной среды на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса. В модели разделяются разрешаемые и неразрешаемые масштабы турбулентного течения на основе вычисления динамических значений параметров подхода, а также учитываются связанные с этим коммутационные ошибки оператора осреднения с пространственными и временной производными. Во второй главе представлены разработанные физико-математические модели для описания переноса энергии быстрыми электронами в различных условиях, а также теоретические модели нагрева плазмы с учётом особенностей переноса быстрых электронов в мишенях ЛТС. Предложена оригинальная физико-математическая модель, учитывающая удалённость области генерации быстрых электронов от центральной сжимаемой части мишени. Поведение быстрых электронов ассоциировано авторами с «эффектом блуждания», заключающемуся в том, что существенная доля быстрых электронов многократно пересекает малоплотную плазменную корону, отражаясь на её границах в электростатическом поле разделения зарядов. В третьей главе описан разработанный трёхмерный программный комплекс PM^2 и приведены результаты валидационного моделирования с использованием экспериментальных данных, полученных в ударных трубах, а также модельных задач для определения чувствительности разработанного метода на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса к используемым параметрам. В четвёртой главе представлены результаты численных расчётов сжатия и горения различных мишеней прямого облучения при учёте электронного переноса

энергии, определены основные характеристики быстрых электронов, при которых можно ожидать зажигания мишеней. Представлены также результаты для ударно-волнового зажигания с использованием двухстадийного импульса. В пятой главе исследуется возможность генерации ударных волн гигабарного уровня давлением пучком быстрых электронов в плоских толстых мишенях. В шестой главе рассматривается процесс прогрева плоских тонких твердотельных мишеней при облучении их пучком релятивистских быстрых электронов. В задаче учтён эффект отражения электронов в электростатическом поле на краях мишени, рассчитаны характерные термодинамические и радиационные характеристики мишеней с конечной (ограниченной) массой, ожидаемый выход нейтронов в дейтерированных мишенях.

Текст хорошо структурирован и позволяет оценить представленные результаты с разных сторон. Изложение охватывает не только рассматриваемые научные проблемы, но и смежные, важные для общности картины и понимания. Тем самым работа представляет собой целостное произведение.

Однако работа не лишена некоторых недостатков, перечисленных ниже:

В работе обсуждаются преимущества подхода на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса (PANS) по сравнению с другими гибридными подходами, такими, как DDES, IDDES, PITM, однако, непосредственного сравнения результатов численных расчётов в работе не представлено.

При описании и обосновании модели блуждания электронов в плазменной короне предполагается движение электронов по прямым траекториям, однако рассеяние на различных неоднородностях, включая турбулентные поля и столкновения с отдельными частицами в короне могут приводить к искривлению траектории. К чему может привести такое искривление и насколько оно существенно?

При рассмотрении распространения пучков быстрых электронов в плазменной среде могут развиваться различные коллективные возбуждения и неустойчивости. В работе подробно не обсуждается роль таких неустойчивостей в процессах переноса энергии.

Важными характеристиками ударных волн является устойчивость и геометрия их фронта. К чему может привести учёт неоднородности в соответствующей главе диссертационной работы?

Отмеченные дискуссионные вопросы и недостатки не влияют на достоверность, значимость и новизну полученных результатов и не препятствуют положительной оценке работы.

7. Соответствие автореферата основным положениям диссертации.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию диссертации.

8. Подтверждения опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.

Основные результаты диссертационной работы полно представлены в работах, опубликованных по теме диссертации. Соответствие основных результатов опубликованным работам ясно отражено в автореферате диссертации для каждой главы.

9. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертация Кучугова П.А. «Математическое моделирование процессов при сжатии лазерных термоядерных мишеней» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые физико-математические модели, численные методы и пакет прикладных программ для моделирования перемешивания веществ при сжатии мишеней ЛТС и переноса в них энергии быстрыми электронами. Результаты работы представляют собой научное достижение, имеющее большое значение для развития методов математического моделирования в физике высоких плотностей энергии, включая лазерный термоядерный синтез. Основные результаты диссертации прошли апробацию на российских и международных конференциях, научных семинарах, в должной мере отражены в научных публикациях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России и международные наукометрические базы. Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа «Математическое моделирование процессов при сжатии лазерных термоядерных мишеней» удовлетворяет требованиям п.п. 9, 10, «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор Кучугов Павел Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

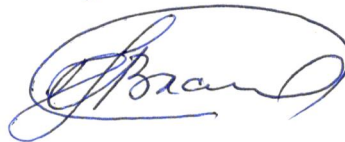
Диссертационная работа Кучугова П.А. и отзыв на нее заслушаны и одобрены на совместном семинаре кафедры теоретической ядерной физики и Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ 18 февраля 2026 г. На заседании присутствовали 14 чел., результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол №02/01 от 18 февраля 2026г.

Заместитель директора Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, к.ф.-м.н., доцент



П.Н. Рябов

Заведующий кафедрой теоретической ядерной физики Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н.




С.В. Попруженко

Директор Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н.



А.П. Кузнецов

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



Н.А. Кудряшов

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес организации: 115409, Москва, Каширское ш., д. 31

Телефон: +7 495 788-5699, +7 499 324-7777

E-mail: info@merphi.ru

Адрес официального сайта в сети «Интернет»: <https://merphi.ru/>