

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
д. ф.-м. н., член-корр. РАН



М.В. Якобовский

"10" ноября 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Математическое моделирование процессов при сжатии лазерных термоядерных мишеней» выполнена в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

В период подготовки диссертации соискатель Кучугов Павел Александрович работал в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в должности старшего научного сотрудника отдела № 15.

В 2010 г. с отличием окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», факультет экспериментальной и теоретической физики (кафедра теоретической и ядерной физики №32) по специальности «Прикладная физика и математика».

Ученая степень кандидата физико-математических наук присуждена решением диссертационного совета при ИПМ им. М.В. Келдыша РАН от 22 мая 2014 г., выдан диплом серия ДКН № 210027 (приказ Министерства образования и науки РФ № 607/нк-2 от 5 ноября 2014 г.).

Научные консультанты – Тишкин Владимир Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий отделом №15 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН; Гуськов Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Привлечение научных консультантов обосновывается потребностями в консультациях и экспертной поддержке в области вычислительной математики и численных методов с одной стороны и в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, ускорения заряженных частиц и физики плазмы с другой.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы исследования исследований обусловлена реализацией в Российской Федерации проектов по строительству мощных лазерных установок (мегаджоульная установка, РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, ЭЛЬФ, НИЯУ «МИФИ», г. Москва) с целью осуществления широких исследований в области физики высоких плотностей энергии, включающих уточнение уравнений состояния веществ в экстремальных условиях, изучение процессов, характерных для астрофизических объектов (лабораторная астрофизика), а также реализации идей лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). Работы по развитию математических инструментов для анализа и планирования таких экспериментов в ближайшее десятилетие будут являться основополагающими для дальнейшего продвижения исследований в этих направлениях. Актуальность направления ЛТС также поддерживается успехами по зажиганию термоядерного топлива, достигнутыми на NIF в схемах непрямого облучения мишеней. При обсуждении эффективности тех или конструкций мишеней, которые можно было бы предложить для экспериментов по зажиганию на российской лазерной установке на первый план выходят вопросы, связанные с несимметрией сжатия и перемешиванием на границах оболочек и влиянием

быстрых электронов, являющихся результатом развития лазерно-плазменных неустойчивостей.

Целью работы является построение физико-математических моделей и программного комплекса на их основе для расчёта задач лазерного термоядерного синтеза, связанных с перемешиванием при развитии гидродинамических неустойчивостей и переносом энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами, применительно к условиям экспериментов на российских и зарубежных лазерных установках.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

Впервые развита физико-математическая модель нагрева мишени лазерно-ускоренными быстрыми электронами, учитывающая особенности распространения частиц в сферических оболочках при многопучковом облучении, заключающиеся в том, что только часть быстрых электронов участвует в прогреве неиспарённых частей мишени, а оставшиеся частицы «блуждают» в короне мишени, отражаясь в поле разделяющихся зарядов на границе плазмы.

Впервые разработана физико-математическая модель нагрева плазмы, учитывающая торможение быстрых электронов в поле обратного тока тепловых электронов.

Разработан **новый** вычислительный алгоритм для численного моделирования переноса энергии быстрыми электронами с учётом развитых физико-математических моделей.

Впервые математическая модель на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса была сформулирована в виде, пригодном для использования в задачах лазерного термоядерного синтеза за счёт учёта сжимаемости веществ и совместного использования адаптивных значений параметров подхода с учётом соответствующих коммутационных ошибок оператора осреднения. Данная модель была **впервые** применена при моделировании сжатия модельной мишени ЛТС.

Создан **новый** программный комплекс РМ² для моделирования лазерной плазмы, включающий **оригинальные** физико-математические модели и алгоритмы.

Выполнено **оригинальное** исследование влияния переноса энергии быстрыми электронами в мишенях прямого облучения на основе развитой модели и разработанного модуля для численного моделирования.

Впервые численно определены параметры мощных ударных волн, индуцированных воздействием потока быстрых электронов при пробеге частиц много меньше толщины мишени, и параметры источников термоядерных нейтронов и рентгеновского излучения при пробеге частиц много больше толщины мишени.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость работы состоит в создании физико-математических моделей, позволяющих описывать такие критичные для осуществления зажигания при прямом облучении мишеней процессы, как перемешивание на границах оболочек и перенос энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами, с учётом особенностей динамики сжатия оболочек. Формулирование модели тормозной способности среды с учётом омической составляющей позволило расширить область её применимости на круг задач, в которых это оказывается существенным. Разработанные для этих моделей вычислительные алгоритмы и программные модули, включённые в одномерные и многомерные численные коды, позволяют анализировать и планировать эксперименты, как в ударных трубах, так и на лазерных установках, что представляет **практическую ценность** для ряда институтов, выполняющих такие работы, в частности, РФЯЦ-ВНИИЭФ и РФЯЦ-ВНИИТФ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Физико-математическая модель распространения быстрых электронов и нагрева ими плазмы, учитывающая особенности их генерации в сферических мишенях ЛТС при многопучковом облучении (эффект «блуждания») и

основные механизмы тормозной способности плазмы, в том числе торможение в поле обратного тока тепловых электронов. Обоснование того, что эффект «блуждания» приводит к снижению потока «прогревающих» быстрых электронов в мишенях прямого облучения.

2. Алгоритм учёта переноса энергии быстрых электронов в одномерных и многомерных программных комплексах.

3. Физико-математическая модель для описания течения в подсеточных масштабах на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса, учитывающая динамическое изменение параметров модели, отвечающих за разделение разрешаемых и неразрешаемых масштабов течения, и связанное с этим наличие коммутационных ошибок оператора осреднения.

4. Трёхмерный программный комплекс PM^2 , реализующий модель на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса, а также включающий модуль переноса энергии быстрыми электронами.

5. Результаты расчётов влияния переноса энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами на динамику сжатия и горения базовой мишени ЛТС прямого облучения, предназначенной для облучения мегаждоульным импульсом с длиной волны излучения, соответствующей 2-ой гармонике Nd-лазера. Установлено, что эффект «блуждания» приводит к значительному расширению области параметров быстрых электронов, при которых можно ожидать зажигания мишени.

6. Результаты расчётов формирования мощных ударных волн гигабарного уровня, а также их характеристики при различных параметрах пучка быстрых электронов. Установлено, что такие ударные волны могут быть получены при использовании лазерного импульса с энергией несколько десятков Дж. При воздействии пучка релятивистских быстрых электронов на мишени из высокозарядовых элементов обнаружено сильное сжатие вещества в периферийной области ударной волны за счёт эффекта радиационного охлаждения.

7. Результаты расчётов, в которых установлены характеристики источников термоядерных нейтронов и рентгеновского излучения, которые можно получить при воздействии пучка релятивистских быстрых электронов на тонкие мишени. Созданные таким образом плазменные объекты могут служить мощным источником нейтронов с удельным выходом (на джоуль лазерной энергии) порядка $10^8 - 10^9$ нейтронов/Дж, а также источником жёсткого рентгеновского излучения.

Личное участие соискателя в получении результатов.

Все результаты диссертации получены **лично соискателем**. Во всех совместных публикациях соискатель внёс **определяющий вклад**, участвуя в формулировании постановок задач, разработке физико-математических моделей, создании вычислительных алгоритмов, реализации программ, представлении и анализе полученных результатов.

Достоверность полученных численных результатов обеспечивается использованием надёжных общепринятых физических приближений и численных методов, а также подтверждается сопоставлением с известными аналитическими решениями, с результатами различных перекрестных расчётов, выполненных с помощью сопоставимых по функциональности численных кодов, а также с доступными экспериментальными данными. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Материалы диссертации **полно** представлены в работах, опубликованных соискателем.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня ВАК:

1. **Кучугов П.А.**, Перенос энергии быстрыми электронами в мишенях лазерного термоядерного синтеза прямого облучения, Квантовая электроника, 55, 7, 401-414, 2025.

2. **Кучугов П.А.**, Расчёт термодинамических параметров в смешанных ячейках при моделировании многокомпонентных течений, Математическое моделирование, 37, 6, 103-118, 2025.

3. **Кучугов П.А.**, Адаптивное изменение параметра физического разрешения в подходе на основе частично усреднённых уравнений Навье-Стокса, Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН № 68, 2024.

4. Брагин М.Д., Гуськов С.Ю., Змитренко Н.В., **Кучугов П.А.**, Лебо И.Г., Левкина Е.В., Невмержицкий Н.В., Синькова О.Г., Стаценко В.П., Тишкин В.Ф., Фарин И.Р., Янилкин Ю.В., Яхин Р.А., Экспериментальное и численное исследование динамики развития неустойчивости Рэлея-Тейлора при числах Атвуда близких к единице, Математическое моделирование, 35, 1, 59-82, 2023.

5. **Кучугов П.А.**, Тишкин В.Ф., Частично усредненные уравнения Навье-Стокса, Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН № 45, 2023.

6. Gus'kov S.Yu., **Kuchugov P.A.**, Yakhin R.A., Zmitrenko N.V., Gigabar shock wave driven by laser-accelerated electron stream, Plasma Physics and Controlled Fusion, 64, 4, 045001, 2022.

7. Gus'kov S.Yu., Demchenko N.N., Dmitriev E.O., **Kuchugov P.A.**, Vergunova G.A., Yakhin R.A., Fast-electron maintaining a high shock-ignition gain with a significant decrease in the laser pulse energy, Plasma Physics and Controlled Fusion, 64, 4, 045011, 2022.

8. Gus'kov S.Yu., **Kuchugov P.A.**, Resistivity contribution to stopping power and plasma heating by laser-accelerated electrons, Physics of Plasmas, 29, 12, 122702, 2022.

9. Gus'kov S.Yu., **Kuchugov P.A.**, Vergunova G.A., Extreme matter compression caused by radiation cooling effect in gigabar shock wave driven by laser-accelerated fast electrons, Matter and Radiation at Extremes, 6, 2, 020301, 2021.

10. Гуськов С.Ю., Зарецкий Н.П., **Кучугов П.А.**, Особенности и предельные характеристики нагрева вещества пучком лазерно-ускоренных быстрых электронов, Письма в ЖЭТФ, 111, 3, 149-153, 2020.

11. Тишкин В.Ф., Гасилов В.А., Змитренко Н.В., **Кучугов П.А.**, Ладонкина М.Е., Повещенко Ю.А., Современные методы математического моделирования развития гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания, Математическое моделирование, 32, 8, 57-90, 2020.

12. Gus'kov S.Yu., **Kuchugov P.A.**, Yakhin R.A., Zmitrenko N.V., The role of fast electron energy transfer in the problem of shock ignition of laser thermonuclear target, High Energy Density Physics, 36, 100835, 2020.

13. Gus'kov S., **Kuchugov P.**, Murakami M., Yakhin R., Mass-limited plasmas heated by laser-driven fast electrons as a powerful source of neutron and hard X-ray radiation, Plasma Physics and Controlled Fusion, 62, 12, 2020.

14. Gus'kov S.Yu., **Kuchugov P.A.**, Yakhin R.A., Zmitrenko N.V., Effect of 'wandering' and other features of energy transfer by fast electrons in a direct-drive inertial confinement fusion target, Plasma Physics and Controlled Fusion, 61, 5, 055003, 2019.

15. Gus'kov S.Yu., **Kuchugov P.A.**, Yakhin R.A., Zmitrenko N.V., Effect of fast electrons on the gain of a direct-drive laser fusion target, Plasma Physics and Controlled Fusion, 61, 10, 105014, 2019.

Монографии:

16. Тишкин В.Ф., Змитренко Н.В., Демченко Н.Н., **Кучугов П.А.**, Лебо И.Г., Яхин Р.А., Математическое моделирование гидродинамических неустойчивостей в мишенях инерциального термоядерного синтеза, Гл. 5, 266-301, Гидродинамические неустойчивости в мишенях инерциального термоядерного синтеза, Саров, ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2024.

Диссертация «Математическое моделирование процессов при сжатии лазерных термоядерных мишеней» Кучугова Павла Александровича

рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Заключение принято на заседании семинара ИПМ им. М.В. Келдыша РАН «Математическое моделирование» под руководством член-корреспондента РАН, д. ф.-м. н., зав. отделом № 15 В.Ф. Тишкина и д. ф.-м. н., г. н. с. А.А. Кулешова.

Присутствовало на заседании 19 чел.

Выступили с положительной оценкой диссертации: С.Ю. Гуськов, В.Ф. Тишкин, Б.Н. Четверушкин.

Результаты голосования: «за» – 19 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 3 от «13» ноября 2025 г.

Чл.-кор. РАН

д-р. физ.-мат. наук

зав. отделом

В.Ф. Тишкин

д-р. физ.-мат. наук

г. н. с.

А.А. Кулешов