

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Актуальность избранной темы.

Проблема зажигания термоядерного топлива в лазерном термоядерном синтезе, бесспорно, является одной из актуальных задач мировой науки в течение нескольких последних десятилетий. С целью продвинуться в её решении создаются крупные экспериментальные комплексы на базе мощных лазерных установок, развиваются новые методы диагностики, разрабатываются теоретические основы различных физических процессов, а также совершенствуются методы математического моделирования этих физических процессов. Всё это позволяет с разных сторон анализировать и оптимизировать характеристики мишеней ЛТС при сжатии. Именно методам математического моделирования отдельных, важных для сжатия, физических процессов и посвящена данная диссертационная работа.

Достижение зажигания требует согласования множества физических процессов между собой. На сегодняшний день можно выделить несколько принципиальных схем, в которых возможно достижение зажигания. В качестве драйверов при этом могут выступать потоки энергии различной природы. Так, принято различать схемы прямого и непрямого облучения мишени лазерными пучками, имеющие свои достоинства и недостатки. К недостаткам схем прямого облучения следует отнести более высокую неоднородность облучения, а также генерацию надтепловых электронов. Оба фактора способны значительно снизить эффективность сжатия мишеней и препятствовать зажиганию и самоподдерживающемуся горению термоядерного топлива. В то же время схемы прямого облучения обеспечивают более высокую поглощённую в мишени энергию и, как следствие, возможность сжатия больших масс термоядерного горючего. Это обстоятельство обеспечивает актуальность таких схем зажигания и их включение в экспериментальные программы на крупных лазерных установках, например, предполагаются к реализации на строящейся российской лазерной установке мегаджоульного уровня энергии. Опираясь на планы по реализации российской программы по лазерному термоядерному синтезу, необходимо отметить, что затронутые в работе вопросы по описанию и исследованию

влияния перемешивания вещества мишени за счёт развития гидродинамических неустойчивостей и переноса энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами на эффективность сжатия в схемах прямого облучения представляют значительный интерес, т.к. от возможности управления этими процессами зависит успех всего мероприятия.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Развитые в работе физико-математические модели опираются на принципы, выражающиеся общефизическими законами, и общепринятые приближения, подтверждённые ранее в работах других авторов. Это обеспечивает их физическую непротиворечивость и достоверность.

Использование методов математического моделирования соответствует поставленным целям и задачам исследования. Для численного решения различных подсистем дифференциальных уравнений в частных производных используются надёжные численные методики, проверенные на широком круге различных задач.

В работе выполнена валидация гидродинамического модуля на экспериментальных данных, полученных в опытах в ударных трубах. Характеристики быстрых электронов, полученные в результате расчётов, согласуются с общими представлениями, а также подтверждаются расчётами других авторов, выполненных с использованием других подходов, в частности, метода Монте-Карло. Расчёты ударных волн гигабарного уровня сопоставлены с расчётами других авторов.

Результаты, представленные в диссертации, достаточно полно отражены в изданиях, рекомендованных ВАК, среди которых присутствуют высокорейтинговые издания, такие как Plasma Physics and Controlled Fusion и Matter and Radiation at Extremes, входящие в первый квартиль Web of Science. Это предполагает проведение непредвзятого рецензирования и всестороннего анализа представленных результатов, что также является подтверждением их достоверности и широкого представления.

Результаты диссертационной работы неоднократно представлялись на российских и международных профильных научных конференциях и семинарах, что также обеспечивает достоверность результатов.

Научная новизна полученных результатов.

В работе получены следующие новые результаты, относящиеся к переносу лазерно-ускоренных быстрых электронов и перемешиванию веществ на контактных границах составных слоёв оболочки сферической мишени.

- Предложена новая модификация подхода на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса, основанная на динамическом вычислении параметров подхода и одновременном вычислении коммутационных ошибок оператора осреднения, связанных с адаптивным изменением параметров подхода. Такая формулировка модели позволяет как подстраиваться под характеристики течения, что важно при расчёте быстроменяющихся сжимаемых течений, так и корректно описывать энергетический баланс, связанный с турбулентными пульсациями.
- На основе предложенной гибридной модели описания турбулентных течений реализован новый трёхмерный программный комплекс в эйлеровых координатах, а также выполнено моделирование сжатия модельной мишени ЛТС в присутствии возмущений на контактных границах. В практически важном случае сферического сжатия показано, что новая формулировка подхода на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса позволяет снизить требования к разрешению численной сетки и получать интегральные зависимости, характеризующие сжатие, идентичные получаемым в расчётах без привлечения моделей турбулентности на более подробных сетках.
- Базовая физико-математическая модель дополнена расчётом переноса энергии быстрыми электронами на основе предложенных новых и оригинальных моделей, учитывающих особенности переноса быстрых электронов в сферических мишенях. А именно, в работе сформулирован эффект «блуждания» быстрых электронов в испарённой части мишени (короне) и развита соответствующая физико-математическая модель переноса, позволяющая определить долю потока энергии быстрых электронов, воздействующую на центральные сжимаемые области мишени. Вычислительный алгоритм включает торможение быстрых электронов за счёт основных столкновительных процессов, а также за счёт электростатического поля обратного тока быстрых электронов, расширенного в работе на случай релятивистских энергий, и рассеяние.
- Впервые для мишеней прямого облучения были получены характеристики быстрых электронов, при которых можно ожидать зажигания с умеренными значениями коэффициента усиления. Численные расчёты сопровождались аналитическими вычислениями согласно новой развитой в работе модели нагрева мишени прямого облучения с учётом сформулированного эффекта «блуждания».
- Исследовано влияние переноса энергии быстрыми электронами с учётом эффекта «блуждания» в мишенях ударно-волнового зажигания и предложены новые конструкции

мишеней, позволяющие снизить энергию, требующуюся для зажигания на 2-ой гармонике Nd-лазера, за счёт вклада энергии быстрых электронов в абляционное давление.

- На основе воздействия потока быстрых электронов на плоские толстые мишени предложены новые экспериментальные постановки для исследования термодинамических свойств веществ в экстремальных условиях при генерации ударных волн с давлением за фронтом порядка нескольких Гбар.
- Предложен новый, ранее не обсуждавшийся подход по нагреву мишеней конечной толщины потоком быстрых электронов, позволяющий нагревать мишени до температур в несколько кэВ, которые позволяют использовать такие плазменные объекты в качестве источников нейтронов и рентгеновского излучения.

Ценность для науки и практики полученных результатов и выводов диссертации и конкретные рекомендации по их использованию.

В работе развиты подходы, физико-математические модели, методы и вычислительные алгоритмы, позволяющие учитывать физические процессы, которые могут существенно влиять на достижение зажигания при сжатии мишеней ЛТС. Физико-математические модели, относящиеся к расширению области применимости классического приближения тормозной способности вещества, имеют высокую ценность для науки. Математические модели нагрева вещества с учётом расширенного описания переноса энергии быстрыми электронами могут быть использованы при планировании актуальных экспериментальных постановок. Созданные программные модули для одномерных и многомерных программных комплексов и вычислительные алгоритмы на базе развитых моделей представляют значительную практическую ценность при проведении поисковых исследований, связанных с задачами ЛТС, для выполнения оптимизационных расчётов, а также для анализа уже выполненных опытов. Созданный трёхмерный программный комплекс PM^2 можно рекомендовать к использованию для моделирования задач перемешивания в нормальных условиях, например, в ударных трубах, и в экстремальных условиях, характерных для задач ЛТС и лабораторной астрофизики. Данный круг задач охватывает широкий список научных организаций, проводящих соответствующие исследования, например, предприятия Росатома, институт космических исследований, МИФИ и многие другие.

Общая оценка содержания диссертации и завершенность.

На основании анализа текста работы и результатов можно заключить, что представленная диссертация является завершенным научно-квалификационным

исследованием, выполненным лично автором. Работа содержит новые научные результаты, имеет высокую теоретическую и практическую значимость, что отмечено выше в соответствующих разделах отзыва, и соответствует требованиям ВАК РФ и установленным ГОСТам.

Работа имеет четкую структуру, включающую введение, 6 глав и заключение, обеспечивающую последовательность и взаимосвязанность изложения. Выводы работы соответствуют поставленным целям.

Автореферат корректно отражает содержание диссертации, содержит в компактной форме основные достижения работы.

Список замечаний по содержанию и оформлению диссертации и автореферата.

Необходимо отметить следующие замечания к содержанию диссертационной работы:

- Необходимо пояснить, почему для определения характерной энергии быстрых электронов используется пондеромоторный скейлинг в условиях их генерации за счёт развития параметрических лазерно-плазменных неустойчивостей.
- В задачах с ограниченной массой рассчитывается нейтронный выход и лишь упоминается о возможности генерации импульсов жёсткого рентгеновского излучения. Было бы полезно на основе результатов спектральных расчётов переноса излучения получить наиболее вероятные значения энергии квантов.
- В случае нерелятивистских быстрых электронов в работе указано, что пробег быстрых электронов за счёт торможения в поле обратного тока тепловых электронов отличается на численный коэффициент от характерного размера, полученного в работе Bell A.R. et al., PRCF, 39, 5, 653-659, 1997. К сожалению, в тексте отсутствует пояснение, с чем связано появление этого коэффициента.
- В работе учёт распределения быстрых электронов по энергиям осуществляется на основе использования средней энергии или усреднения с начальным энергетическим спектром. Хорошо известно, что для этих целей предназначено многогрупповое приближение. Необходимо пояснить, почему в работе не используется многогрупповое приближение.
- Насколько значительна доля энергии быстрых электронов, которая тратится на ускорение быстрых ионов в самосогласованном поле на границе мишени. Учитывался ли эффект трансформации энергии быстрых электронов в энергию быстрых ионов в численных расчётах?

- В работе в Главе 1 указано, что в случае произвольного уравнивания состояния процедура осреднения приводит к появлению дополнительного слагаемого за счёт турбулентных пульсаций термодинамических величин, которым, однако, пренебрегается. Необходимо пояснить, при каких условиях это можно делать.

Данные замечания не влияют на общее положительное впечатление от работы и не умаляют её достоинств.

Таким образом, диссертация Кучугова Павла Александровича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в решении задач математического моделирования переноса энергии быстрыми электронами в сферических мишенях ЛТС и плазменных объектах с контролируемой массой, а также перемешивания веществ на контактных границах в условиях нестационарного гидродинамического течения сжимаемой мишени, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора наук.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теплофизики ФГАОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский
университет)»

105005, РФ, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5. стр. 1,

+7 499 263-65-70, svryzhkov@bmstu.ru

Сергей Витальевич Рыжков

«31» марта 2026 г.



Шифры специальностей, по которым защищена докторская диссертация Рыжкова С.В. – 01.04.08 – Физика плазмы, 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Подпись С.В. Рыжкова заверяю

ведущий документовед научно-учебного комплекса “Энергомашиностроение” ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)»

Щепеткова Т.В.