

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Кучугова Павла Александровича

«Математическое моделирование процессов при сжатии лазерных термоядерных мишеней», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность

Современные исследования невозможно представить без привлечения численного моделирования для предсказания и анализа экспериментальных данных или проверки достоверности теоретических моделей. Это справедливо для всех отраслей знаний, а созданные инструменты в виде программных комплексов широко востребованы.

В данной работе автор обращается к современной актуальной задаче по математическому описанию различных процессов при сжатии мишеней лазерного термоядерного синтеза и, в частности, процессов турбулентного перемешивания веществ оболочек и переноса и торможения быстрых электронов. Эти два направления особенно актуальны при обсуждении будущих экспериментов по прямому облучению мишеней на строящейся в РФЯЦ-ВНИИЭФ лазерной установке с полной энергией порядка 2-3 МДж.

Проблема перемешивания веществ на контактных границах является глобальной и не ограничивается задачами ЛТС. Развитие новых подходов, особенно позволяющих моделировать существенно нестационарные течения, представляет общенаучный интерес.

В то время как всё внимание специалистов в области ЛТС приковано к экспериментам по непрямому облучению на NIF, где перенос энергии лазерно-ускоренными электронами не играет существенной роли, применительно к схемам прямого облучения остаётся ряд открытых вопросов, связанных с распространением быстрых электронов, без решения которых невозможно предложить работоспособные конструкции мишеней.

Кроме всего прочего, облучение потоком быстрых электронов позволяет достигать состояния плазмы со сверхвысокими значениями плотности и температуры, открывая возможность формулирования перспективных экспериментальных постановок.

Ценность для науки и практики полученных результатов

Развитые в работе физико-математические модели и численные алгоритмы для учёта процессов перемешивания оболочек и переноса энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами при математическом моделировании задач лазерного термоядерного синтеза представляют теоретическую ценность для науки, т.к. расширяют применимости классических приближений.

Созданный новый трёхмерный программный комплекс и усовершенствованный одномерный численный код представляют практический интерес и могут быть использованы для сопровождения экспериментов на крупных лазерных установках в России и за рубежом, например, в федеральных ядерных центрах. Кроме того, применение трёхмерного программного комплекса возможно для моделирования свободных турбулентных течений в ударных трубах.

Предложенные постановки экспериментов по достижению экстремальных характеристик плазмы при воздействии пучком быстрых электронов могут быть рекомендованы для включения в экспериментальные программы на современных лазерных установках.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Автор использует общепринятые приближения при конструировании физико-математических моделей, а также надёжные и обоснованные численные методы для решения различных подсистем уравнений, что обеспечивает обоснованность результатов работы. Для отдельных модулей представлены результаты верификационных и валидационных расчётов,

приведены результаты сопоставления с экспериментальными данными и расчётами других исследователей.

Научная новизна полученных результатов

На основе хорошо теоретически обоснованного гибридного подхода по частичному осреднению уравнений Навье-Стокса предложено использовать подстраиваемые под характеристики турбулентного течения параметры подхода с одновременным учётом возникающих при этом членов, отражающих коммутационные ошибки оператора осреднения. Такая формулировка подхода для сжимаемых течений была впервые предложена в работе и использовалась для моделирования сжатия мишени при наличии возмущений на контактных границах между оболочками. Практическая реализация состояла в разработке нового вычислительного алгоритма на базе надёжных численных методов и создании нового трёхмерного программного комплекса.

Для источниковых членов, отражающих перенос энергии быстрыми электронами, были развиты новые оригинальные физико-математические модели: во-первых, модель переноса частиц в сферических мишенях, позволяющая определить долю потока энергии быстрых электронов, которые попадают в центральные области мишени, во-вторых, модель тормозной способности электростатического поля обратного тока тепловых электронов. С целью реализации этих моделей в виде программных модулей были разработаны соответствующие новые вычислительные алгоритмы. Для конкретных конструкций мишеней впервые получены характеристики быстрых электронов, при которых возможно успешное зажигание DT-топлива. Данная группа численных расчётов дополняется развитыми аналитическими моделями нагрева плазмы с учётом упомянутых выше особенностей переноса и протекающих явлений.

Сформулированы параметры новых экспериментов по облучению плоских мишеней потоком быстрых электронов, которые позволят исследовать

свойства веществ в ударно-волновых экспериментах при ультравысоких давлениях в условиях, аналогичных условиям внутри гигантских планет и звёзд. В численных расчётах впервые обоснована идея нагрева вещества с плотностью, близкой к начальной, до температур порядка нескольких кэВ, которые могут выступать источником нейтронов или рентгеновского излучения.

Общая оценка содержания диссертации и завершенность

Диссертационная работа Кучугова П.А. представляет собой законченный научный труд, достаточно широко охватывающий выбранное направление исследований. Работа имеет следующую структуру: введение, 6 глав и заключение. Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи работы, представлены результаты, их новизна, оригинальность и значимость. В первой главе сформулирована базовая физико-математическая модель течения многокомпонентной вязкой теплопроводной среды на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса. 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. В третьей главе приведено описание трёхмерного программного комплекса PM² и используемых численных методик, приведены результаты моделирования валидационных задач, а также модельных задач для определения влияния параметров подхода на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса на интегральные характеристики. В четвёртой главе представлены результаты численных расчётов сжатия и горения различных мишеней прямого облучения с учётом переноса энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами. Определены характеристики быстрых электронов, при которых можно ожидать зажигание мишеней. В пятой главе представлены результаты численных расчётов облучения плоских толстых (по сравнению с пробегом

частиц) мишеней пучком быстрых электронов, в результате которого возможно создание ударных волн гигабарного уровня давления. В шестой главе представлены результаты численных расчётов облучения плоских тонких (по сравнению с пробегом частиц) твердотельных мишеней пучком релятивистских быстрых электронов. В заключении приведены основные результаты работы.

Структура работы и представление материала позволяют всесторонне оценить результаты работы. Работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК.

Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Замечания

Необходимо отметить следующие недостатки работы, которые, однако, не влияют на общую положительную характеристику работы.

1. Несмотря на общую согласованную структуру работы и достаточно полное изложение, автору следовало бы уделить большее внимание представлению результатов верификационных расчётов для каждого расчётного модуля.
2. В работе много внимания уделено построению физико-математических моделей, достаточно подробно представлены численные методы для решения отдельных систем уравнений, но при этом скупо описаны вычислительные алгоритмы без графического сопровождения в виде схем.
3. Моделирование развития неустойчивостей и перехода к перемешиванию в модельной мишени ЛТС осуществляется при использовании подсеточной модели на базе k - ε -модели. Рост возмущений на некоторых стадиях сжатия происходит за счёт развития неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, при этом известно, что стандартная k - ε -модель не обеспечивает генерацию турбулентности на ударных волнах. Необходимо пояснить технику применения k - ε -модели в качестве базовой модели подхода на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса в задачах ЛТС.

4. В работе недостаточно подробно проводится обоснование выбора тех или иных базовых численных методик. Так, например, для решения уравнения теплопроводности используется неявная итерационная схема с итерациями по нелинейности, скорость сходимости которых в задачах физики высоких плотностей энергии может быть достаточно медленной, что приводит к дополнительным вычислительным затратам. Необходимо пояснить, так ли это и есть ли необходимость привлечения более экономичных схем.
5. Известно, что замыкание систем осреднённых уравнений газодинамики, а также их дискретное представление, особенно в вихреразрешающих подходах, может приводить к нарушению галилеевой инвариантности уравнений. Следует прояснить, инвариантны ли частично осреднённые уравнения Навье-Стокса относительно преобразования Галилея.
6. Для задач о воздействии потока быстрых электронов на плоские мишени используются одномерные постановки задач. Влияние многомерных эффектов анализируется аналитически. Примеры многомерных (хотя бы двумерных) расчётов были бы полезным дополнением к аналитическим оценкам.
7. Текст содержит некоторое количество орфографических ошибок.

Заключение

Диссертационная работа Кучугова Павла Александровича удовлетворяет требованиям п.п. 9, 10 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся учёной степени доктора наук. А именно, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором оригинальных исследований разработаны теоретические положения, заключающиеся в создании физико-математических моделей для описания некоторых процессов при сжатии мишеней ЛТС, разработке соответствующих вычислительных алгоритмов и программных модулей, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в решении задачи математического моделирования задач лазерного термоядерного синтеза, а ее

автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой «Математика и информатика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Донской государственной технической университет 344003, ЮФО, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1 +7 863 238-15-22, sukhinov@gmail.com

 А.И. Сухинов

« 16 » марта 2026 г.

Шифр специальности, по которой защищена докторская диссертация Сухинова А.И. – 05.13.18. – Теоретические основы математического моделирования, численные методы и комплексы программ.

Подпись Сухинова Александра Ивановича удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ДГТУ



 В.Н. Анисимов