



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

ПРЕДПРИЯТИЕ ГОСКОРПОРАЦИИ "РОСАТОМ"

**Федеральное государственное унитарное предприятие
«Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е.И. Забабахина»
(ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»)**

ОТЗЫВ НА АВТОРЕФЕРАТ

диссертации 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»

Автореферат диссертации Кучугова П.А. посвящен численным исследованиям процессов сжатия мишеней лазерного термоядерного синтеза. Основное внимание уделено переносу энергии быстрыми электронами и развитию перемешивания веществ на контактных границах.

Актуальность работы определяется сложностью проведения достоверных численных расчётов сжатия лазерных мишеней, в которых развиваются газодинамические неустойчивости, переходящие в стадию турбулентного перемешивания веществ. Наиболее достоверное «прямое» численное моделирование невозможно в настоящее время из-за недоступности требуемых огромных вычислительных ресурсов. Полуэмпирические модели, основанные на использовании осреднённых уравнений Навье-Стокса, действуют на развитие всех длин волн возмущений, оттого, во-первых, избыточно влияют на развитие крупномасштабных возмущений и, во-вторых, требуют подбора коэффициентов модели на экспериментальных и расчётных данных. Также полуэмпирические модели предполагают переход течения в турбулентную стадию, что для условий сжатия лазерных мишеней не достигается. Экспериментальных данных для верификации моделей и подбора коэффициентов недостаточно, и получены они лишь на одной установке в мире NIF с достаточной для зажигания термоядерных процессов энергетикой. Численных расчётов, с которыми можно было бы проводить сравнение, нет, поскольку не существует общепринятой технологии расчётов сжатия мишеней.

Подход, основанный на явном Методе Крупных Вихрей, в настоящее время продолжает развиваться в нескольких научных центрах в мире и до завершения исследований ещё далеко.

Привлекательным является современный подход, основанный на частичном осреднении уравнений Навье-Стокса – PANS модель, который по идее должен совместить полуэмпирический подход и Метод Крупных Вихрей, позволив описывать переход от неустойчивого течения к турбулентному. Этот подход и взят за основу Кучуговым П.А. для описания газодинамического течения.

При сжатии лазерных мишеней предпрогрев быстрыми электронами существенно ухудшает сжатие горючего, что влияет на развитие неустойчивостей и перемешивание веществ. В представленном автореферате диссертации численное моделирование сжатия мишеней учитывает перенос энергии быстрыми электронами.

Научная новизна диссертационной работы Кучугова П.А. заключается в построении математических моделей и численных методов для моделирования нагрева мишени быстрыми электронами и развития неустойчивостей и турбулентного перемешивания. При этом рассчитывается и поглощение лазерного импульса. В модели переноса энергии быстрыми электронами выполнен анализ роли электронов, нагревающих как неиспарённую часть мишени, так и корону мишени. Рассмотрено взаимодействие быстрых и тепловых электронов. Для описания турбулентного перемешивания применена модель частично осреднённых уравнений Навье-Стокса. Перечисленная совокупность процессов учтена в новом созданном автором трёхмерном программном комплексе РМ2. С использованием комплекса выполнены расчёты сжатия лазерных мишеней прямого облучения. Получены параметры ударных волн и источников термоядерных нейтронов.

Практическая значимость работы состоит, во-первых, в создании физико-математической модели для описания процессов сжатия лазерных мишеней прямого облучения, учитывающей как влияние процессов перемешивания веществ, так и перенос энергии быстрыми электронами. Во-вторых, в разработке численных методов решения систем уравнений модели. В-третьих, в создании многомерных программ, реализующих разработанные численные методы. В-четвёртых, в проведении тестовых расчётов. Разработанные модель, алгоритмы и программа позволяют проводить сравнительный численный анализ существующих экспериментальных данных по развитию процессов перемешивания в задачах физики высоких плотностей энергии с программами, разрабатываемыми в РФЯЦ-ВНИИТФ и РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Автореферат изложен на 34 страницах машинописного текста, содержащих 12 рисунков. Представлен список публикаций соискателя по теме диссертации, состоящий из 16 работ, опубликованных в печатных изданиях, 15 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК.

Во введении описываются актуальность исследований, цели работы, научная новизна, практическая значимость. В первой главе представлена модель среды на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса, во второй главе модели переноса энергии быстрыми электронами, в третьей программный комплекс RM2 и результаты тестовых задач, в четвёртой результаты расчётов сжатия и горения мишеней прямого облучения, в пятой результаты расчётов плоских толстых мишеней, в шестой плоских тонких мишеней. В заключении приведены основные результаты работы.

Автореферат написан хорошим литературным языком, содержит понятные обозначения и рисунки.

В работе имеются недостатки. Некоторые из них.

1. Нет оценок, насколько численная диффузия программы RM2 позволяет увидеть эффект диффузии за счёт PANS модели. Что преобладает в расчётах сжатия мишеней – численные артефакты или физические процессы, описываемые моделью?
2. Нет тестов, показывающих корректность реализации PANS модели.
3. При учёте переноса энергии быстрыми электронами насколько соблюдаются балансы? В частности, насколько соблюдается закон сохранения энергии? Почему не учитывается вклад в энергию джоулева нагрева от обратного тока в плазме?
4. Для демонстрации независимости решения от размера численной сетки – сходимости или стабильности результатов, нужны, по крайней мере, 3 сетки разного размера. В некоторых тестах и расчётах приведены данные только для 2-х сеток, многие расчёты выполнены только на одной сетке.

Обозначенные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертационная работа в целом является логичным, законченным, самостоятельным исследованием, имеющим как научную новизну, так и практическую значимость. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Работа соответствует критериям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а Кучугов Павел Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв на автореферат диссертационной работы Кучугова П.А. дан по результатам обсуждения работы на заседании НТС НТО-2 РФЯЦ-ВНИИТФ (протокол № 323 от 16 апреля 2026 г.).

Я, Дрёмов Владимир Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Кучугова Павла Александровича, и их дальнейшую обработку.

Заместитель начальника,
заместитель председателя НТС
научно-теоретического отделения ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ»
доктор физико-математических наук



Владимир Владимирович Дрёмов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина» (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина»)

Адрес: 56770, Снежинск, Челябинская область, ул. Васильева, 13, а/я 245

Телефон: 8 (35146) 5-51-20

E-mail: vniitf@vniitf.ru