

ОТЗЫВ
на автореферат диссертации Кучугова Павла Александровича
на тему «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 выполненной работы

При рассмотрении сжатия сферических мишеней лазерного термоядерного синтеза основное внимание уделяется несимметрии сжатия, представляющей собой рост длинноволновых возмущений, не переходящих к стадии нелинейного взаимодействия за конечное время процесса имплозии. В то же время коротковолновые возмущения, обусловленные шероховатостью различных поверхностей мишени и мелкомасштабной неоднородностью падающего лазерного пучка, будучи также неустойчивыми, за конечное время могут перейти в стадию турбулентного перемешивания, влияя на протекание других процессов. Натурное и численное моделирование турбулентного перемешивания представляет важную и актуальную задачу, которой посвящено множество работ. В данной диссертационной работе предложен подход для описания и численного моделирования турбулентного перемешивания в случае быстропротекающих разномасштабных процессов.

Ещё одной сложностью на пути достижения зажигания, свойственной, в частности, схемам с прямым воздействием лазерного излучения на мишень, является генерация надтепловых электронов в лазерно-плазменных неустойчивостях в короне мишени. За счёт того, что тормозной массовый пробег надтепловых электронов определяется только их начальной энергией, они могут распространяться в значительно сжатых областях, что для мишеней ЛТС означает риск прогрева центральной части и снижение степени сжатия с последующим ухудшением характеристик горения топлива. Данный вопрос также исследован в работе для различных мишеней, а для описания переноса надтепловых электронов в сферических конструкциях предложена оригинальная физико-математическая модель, учитывающая особенности их распространения.

Таким образом, вопросы, затронутые в работе, бесспорно являются актуальными с точки зрения возможности достижения зажигания на будущих лазерных установках.

Научная новизна и значимость полученных результатов

В работе предложен подход для численного описания турбулентного перемешивания в нестационарных сильно сжимаемых течениях, а также разработана численная методика для решения соответствующей системы уравнений в частных производных. Новизна использованного подхода заключается в совместном расчёте динамических адаптивных значений параметров подхода, присутствующих в уравнениях для импульса, энергии и турбулентных величин.

Создан новый трёхмерный программный комплекс, в основе которого лежит предложенный автором подход по математическому моделированию турбулентных течений, предназначенный в основном для расчётов течения плотной плазмы, характерной для финальных стадий сжатия термоядерных мишеней. Выполнено моделирование сжатия модельной мишени, на примере которого показано, что предложенный подход позволяет

снизить требования к разрешению расчетной сетки и использовать более грубые сетки, получая идентичные интегральные характеристики сжатия.

В работе впервые на основе математического моделирования сжатия мишени ЛТС прямого облучения, предложенной для использования на российской лазерной установке мегаджоульного уровня энергии, было выполнено исследование влияния эффекта блуждания на коэффициент усиления и определены параметры потока лазерно-ускоренных быстрых электронов, при которых ожидается самоподдерживающееся горение термоядерного топлива.

Для схем ударно-волнового зажигания предложены новые конструкции мишеней, зажигание которых возможно при меньшей энергии зажигающего лазерного импульса за счёт вклада энергии быстрых электронов в не испарённую часть внешней оболочки и, как следствие, повышение абляционного давления.

Имея инструмент для моделирования переноса энергии быстрыми электронами, область исследования диссертационной работы не ограничивается мишенями ЛТС, а также затрагивает вопросы воздействия потока быстрых электронов на плоские мишени. В работе впервые получены характеристики лазерного импульса, достаточные для генерации ударных волн с давлением за фронтом выше 1 Гбар. Также впервые обсуждается идея нагрева твердотельной мишени до температур порядка нескольких кэВ за счёт многократных пролётов быстрых электронов через неё при отражении в электростатическом поле на границе. Такие плазменные объекты в зависимости от вещества мишени могут выступать источниками термоядерных нейтронов или жёсткого рентгеновского излучения.

Значимость для науки и практики полученных результатов

Развитые в работе новые физико-математические модели для описания переноса лазерно-ускоренных быстрых электронов расширяют применимость приближения тормозной способности вещества, что представляет ценность для науки. Развитые модели нагрева плазмы с учётом особенностей переноса быстрых электронов в мишенях ЛТС могут использоваться для быстрых аналитических оценок при анализе и планировании соответствующих экспериментов. Значительным практическим достижением является подход для моделирования нестационарных турбулентных течений, позволяющий снизить требования к численной сетке. Предложенная численная схема для его реализации представляет ценность для науки.

Созданный трехмерный программный комплекс и вычислительные модули для математического моделирования переноса энергии быстрыми электронами представляют практический интерес для научных институтов, ведущих соответствующие исследования. В частности, автором работы были успешно выполнены работы для института физики взрыва РФЯЦ-ВНИИЭФ по моделированию течений в ударных трубах в рамках работ Национального центра физики и математики..

Кроме того, в работе решён ряд практически важных задач как в направлении ЛТС, так и для целей исследования термодинамических свойств веществ в экстремальных условиях.

Язык и стиль автореферата

Автореферат диссертации написан ясно, содержит необходимую информацию для оценки полученных результатов работы.

По материалам автореферата имеются следующие вопросы и замечания.

1. На рисунках 2 и 3 в расчетах, по сравнению с опытами, не наблюдается интенсивного развития турбулентности от сдвиговой неустойчивости. С чем это связано?

2. По рисунку 5 зависимости плотности не дают однозначного подтверждения увеличения полной турбулентной энергии по программе автора по сравнению с расчетом LES, так как максимальные плотности на разных сетках показывают разное поведение. Почему-то не приведены сами графики турбулентной энергии.

3. Декларируется трехмерная методика, а в реферате результаты только, в лучшем случае, двумерные.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертационная работа в целом является 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 именно, созданные физические модели и численные коды, позволяющие проводить численное моделирование в многомерном приближении, и полученные новые результаты в области математического моделирования ряда физических процессов, характерных для задач лазерного термоядерного синтеза, можно квалифицировать как научное достижение, а Кучугов Павел Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Доктор физико-математических наук,
доцент, начальник лаборатории Института
экспериментальной газодинамики и физики
взрыва ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»

Николай Васильевич Невмержицкий

Доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, главный
научный сотрудник Института
теоретической и математической физики
ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ»

Юрий Васильевич Янилкин

ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ», пр-т Мира д. 37, г. Саров, Нижегородская область, 607188,
Факс: (83130) 25638, e-mail: staff@vniief.ru

Подписи Невмержицкого Н.В. и Янилкина Ю.В. заверяю:

Директор департамента кадрового
администрирования



М.В. Лапкина

31.03.2026г.