

## 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

Основным объектом диссертационного исследования являются мишени лазерного термоядерного синтеза, облучаемые потоком лазерного излучения. Поток вещества, испарённого с поверхности мишени, толкает неиспарённые слои к центру, сжимая и нагревая вещество, в частности, термоядерное топливо, до температур, при которых возможно осуществление реакций синтеза ядер. Сжатие мишени лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) сопровождается целым спектром разномасштабных физических процессов, которые необходимо принимать во внимание. В диссертационной работе особое внимание отводится теоретическому и численному описанию перемешивания оболочек мишени, а также переносу энергии лазерно-ускоренными быстрыми электронами.

**Актуальность темы диссертационного исследования.** Исследование ЛТС является одной из наиболее актуальных физических задач последних десятилетий, успешная реализация которой позволит получить неисчерпаемый источник энергии. О перспективности данного направления физики высоких плотностей энергии свидетельствуют успехи, достигнутые зарубежными исследователями. Примером являются работы, выполняемые в Национальном центре зажигания (NIF), расположенном в Ливерморской национальной лаборатории Лоуренса. Востребованность развития данной тематики обеспечивается строительством российской лазерной установки с близким уровнем лазерной энергии.

Основным препятствием на пути достижения требуемых характеристик сжатия и нагрева мишеней ЛТС, с одной стороны, является развитие классических гидродинамических неустойчивостей и порождаемого ими турбулентного перемешивания веществ оболочек, с другой стороны - прогрев центральной области мишени за счёт переноса собственного излучения плазмы или быстрых электронов, являющихся результатом ускорения тепловых электронов в лазерно-плазменных неустойчивостях. Создание моделей процессов и их реализация в виде программных модулей газодинамических кодов в этих направлениях является важной и востребованной задачей.

**Научная новизна.** В работе развиты новые физико-математические модели для описания переноса лазерно-ускоренных быстрых электронов в сферических мишенях и передачи ими энергии среде. Предложенный оригинальный подход к вычислению долей потока быстрых электронов, многократно пересекающих малоплотную разлетающуюся часть мишени и движущихся через сжимаемые слои мишени, позволяет корректно рассчитывать предварительный прогрев центральной части мишени и включать данный фактор в схемы оптимизации конструкций мишеней. Разработан новый вычислительный алгоритм для включения развитых моделей передачи энергии от быстрых электронов среде, в которой они распространяются, для включения в гидродинамические численные коды. На основе обобщения и стыковки различных наработок в области гибридного RANS-LES похода на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса предложена базовая модель для описания перемешивания веществ на контактных границах оболочек мишеней. Оригинальный вычислительный алгоритм позволяет учесть адаптивное изменение параметров подхода и связанные с этим изменением коммутационные ошибки оператора осреднения. На базе развитой физико-математической модели и вычислительного алгоритма реализован новый трёхмерный программный комплекс для моделирования финальной стадии сжатия термоядерных мишеней. Данный подход был впервые применён для расчёта сжатия мишени с возмущенной контактной границей между слоями, и было продемонстрировано снижение требований к численной сетке за счёт подстройки параметров подсеточной модели к характеристикам течения.

На основе разработок в области численного моделирования были решены практически важные задачи. В частности, применительно к различным типам мишеней впервые установлены параметры потока лазерно-ускоренных быстрых электронов, при которых возможно осуществление зажигания мишеней. Исследования воздействия потока быстрых электронов на плоские мишени позволило определить характеристики мощных ударных волн и источников нейтронов и рентгеновского излучения, ранее установленные только на основе оценочных аналитических выражений.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования.** Построенные в работе физико-математические модели базируются на общепринятых приближениях, что обеспечивает их физическую непротиворечивость. Реализованные в программных комплексах соответствующие алгоритмы верифицированы на известных аналитических решениях, а также сопоставлены с численными результатами, получаемыми с помощью программ, схожих по функциональности.

Результаты диссертационного исследования были неоднократно доложены на российских и международных конференциях и на профильных семинарах, где вызвали заинтересованность и получили одобрение научного сообщества. Результаты работы также были опубликованы в ряде ведущих специализированных журналов.

**Теоретическая и практическая значимость.** В диссертационной работе представлен ряд физико-математических моделей для переноса энергии быстрыми электронами, расширяющих область применимости классического приближения тормозной способности вещества. Развитые модели могут быть использованы для аналитических оценок при планировании и анализе экспериментов по воздействию пучков быстрых электронов на различные мишени. Нарботки в области моделей турбулентности применены для расчёта задач ЛТС с целью снижения требований к подробности численных сеток, необходимых для моделирования мелкомасштабного перемешивания веществ на границах оболочек, что является важным практическим достижением. Необходимо также отметить, что круг задач, для моделирования которых возможно использовать созданный трёхмерный программный комплекс, не ограничивается задачами лазерного термоядерного синтеза, и может включать, например, задачи исследования атмосферы.

Результаты в области конструирования физико-математических моделей и численных алгоритмов, представленные в диссертационной работе, позволили решить ряд практически важных задач, связанных с генерацией мощных ударных волн с целью изучения термодинамических свойств веществ и созданием источников нейтронов и рентгеновского излучения для разработки возможных новых диагностических подходов. Возбуждение ударных волн потоком лазерно-ускоренных электронов позволяет достигать более высоких давлений по сравнению с воздействием лазерного излучения, что открывает новый диапазон давлений и плотностей для экспериментального исследования свойств веществ в экстремальных условиях. Решённые задачи по влиянию быстрых электронов на характеристики сжатых мишеней позволяют выбрать корректные стратегии оптимизации для получения целевых значений.

**Структура и содержание диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и заключения полным объёмом 316 стр. Список литературы содержит 374 наименования. Работа достаточно хорошо структурирована, написана ясным языком и оформлена в соответствие с требованиями ВАК. Работа представляет собой целостное завершённое научное произведение, включающее широкий охват разработанных направлений исследований.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

## **Замечания.**

1. При разработке физико-математической модели для описания течения в подсеточных масштабах на основе частично осреднённых уравнений Навье-Стокса в поле внимания соискателя не оказался замечательный подход построения единственных средних, предложенный в работе: В.П. Маслов, “Нарушение принципа причинности для нестационарных уравнений двумерной и трехмерной газовой динамики при достаточно больших числах Рейнольдса”, *ТМФ*, **69**:3 (1986), 361–378. Ясно, что в диссертации автор получил ответы на поставленные вопросы исследования, тем не менее, обращение к работе В.П. Маслова позволило бы получить дополнительную верификацию результатов.

2. В работе используется односкоростное приближение для моделирования рассматриваемой среды. В связи этим возникает вопрос об ограничениях его применимости. Возможна ли в рассматриваемой задаче ситуация, при которой в одном объёме компоненты движутся с разной скоростью?

3. Необходимо пояснение почему выбрана именно такая модель многокомпонентной среды. Существует множество подходов: Volume of Fluid, level-set, diffuse interface и многие, многие другие, каждый со своими преимуществами и недостатками. Стоит пояснить, в чём сильная сторона выбранного подхода в рассматриваемых задачах.

4. Не совсем ясно, какие уравнения состояния используются в работе. Соискатель ссылается на приближение идеального газа, однако остаётся неясным, насколько такое приближение справедливо для моделирования высокоэнергетических процессов сжатия мишеней. Эту сторону исследования осталась за кадром при рецензировании.

**Заключение.** Анализ полученных теоретических и практических результатов позволяет заключить, что диссертационная работа Кучугова П.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в решении задачи математического моделирования процессов, характерных для лазерного термоядерного синтеза.

Диссертационная работа Кучугова П.А. соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических

наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, академик РАН,  
директор ФГБУН Институт прикладной математики Дальневосточного отделения  
Российской академии наук,  
690041, РФ, г. Владивосток, ул. Радио, д. 7,  
+7 423 231 18 56, guzev@iam.dvo.ru



М.А. Гузев

«27» февраля 2026 г.

Шифр специальности, по которой защищена докторская диссертация Гузева М.А. –  
01.02.04. – Механика деформируемого твердого тела.

Подпись М.А. Гузева заверяю

*Степанов*  
*И.В.И. ЯВ*



*С.В. Терехин*