

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Цыгвинцева Ильи Павловича «Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе лазерной плазмы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ**

В настоящее время перед ведущими мировыми разработчиками микросхем встала необходимость перехода на фотолитографические установки нового поколения, работающие с излучением экстремального ультрафиолетового диапазона (ЭУФ). Разработка этих установок — комплексный процесс, включающий в себя ряд конкретных технических задач: разработку и оптимизацию источника излучения, системы обеспечения стабильности работы источника и оптической фокусирующей и перенаправляющей системы. Моделирование физических процессов, происходящих в отдельных элементах установки, позволяет получить не только качественное понимание взаимосвязи этих процессов, но и количественные оценки оптимальных параметров. В отдельных случаях свести задачу к двумерной оказывается невозможно и требуется полное трёхмерное моделирование. До настоящего времени единственным комплексом программ, способным обеспечить трёхмерное моделирование источника ЭУФ-излучения на основе лазерной плазмы, был комплекс HYDRA, разработанный в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (LLNL), однако в связи с проблемами обеспечения национальной безопасности США, использование его за пределами США не представляется возможным. Поскольку основной задачей, поставленной диссертантом, является разработка аналогичного отечественного программно-вычислительного комплекса на основе оригинальной физико-

математической модели, диссертация И. П. Цыгвинцева соответствует критерию актуальности. Соответствие выполненного исследования критерию новизны также не вызывает сомнений, так как диссертация посвящена разработке новых математических моделей и средств численного исследования задач радиационной плазмодинамики, а сами задачи данного класса изучены автором диссертации в новых постановках, соответствующих новым экспериментальным схемам.

Диссертационная работа Цыгвинцева И. П. «Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе лазерной плазмы» направлена на разработку численных методик и программ, сопровождающих прикладные исследования, связанные с разработкой нового поколения фотолитографических установок. Успешное завершение этих исследований позволит существенно уменьшить размер элементов микросхем.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырёх глав, и общих выводов, список литературы состоит из 94 наименований. Каждая глава заканчивается промежуточными выводами. Общий объем диссертации составляет 156 страницы.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, представлена информация о практической значимости и научной новизне, изложены сведения о структуре работы.

В **обзоре литературы** автором проводится обзор существующих в настоящее время программно-вычислительных комплексов, применяющихся для моделирования ЭУФ-источника.

В **первой главе** автор формулирует физико-математическую модель процессов, протекающих в лазерной плазме, и подробно исследует свойства модели переноса и поглощения лазерного излучения в плазме.

Во **второй главе** описывается дискретизация построенной модели на основе конечно-разностной численной схемы в смешанных лагран-

жево-эйлеровых переменных и демонстрируются некоторые качества этой конечно-разностной схемы.

Третья глава посвящена описанию алгоритма решения полученных алгебраических уравнений и тестированию его на модельных задачах газовой динамики.

Демонстрация приложений алгоритма к практическим задачам представлена в **четвёртой главе**.

Достоверность научных положений обусловлена использованием конечноразностных методик с гарантированными свойствами аппроксимации, устойчивости и сходимости к точному решению, а также верификацией и апробацией работы вычислительного комплекса на модельных задачах с известным решением и анализом расчётов практических задач.

По содержанию диссертации имеются следующие замечания:

1. Построенная во второй главе конечно-разностная схема не является полностью консервативной в строгом понимании этого термина, при этом отметим, что работа сил давления определяется с погрешностью второго порядка малости по шагу сетки, что может привести к генерации избыточной энтропии на отдельных классах течений.
2. В третьей главе приводятся лишь качественные оценки согласия результатов численных расчётов с аналитическим решением модельных задач. Количественные оценки приведены только для моделирования неустойчивости Рэля-Тейлора.
3. В разделе 3.6 "Структура распараллеливания алгоритмов и исследование эффективности распараллеливания на гибридных вычислительных кластерах" третьей главы не приведены сведения об эффективности MPI-подхода.

4. В разделе "Структура и объём диссертации" приведены неверные сведения о количестве рисунков. Работы 9 и 15 в списке публикаций автореферата не являются публикациями.

Приведенные замечания в основном имеют редакционный характер, так как соответствующие недостатки затрудняют восприятие материалов работы. Однако эти замечания не являются препятствием для общей высокой оценки диссертации. Ценность представленной работы состоит в построении и реализации новых физико-математических моделей и реализации их посредством параллельного алгоритма, а также демонстрации возможности расчёта новых прикладных задач.

Работа «Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе лазерной плазмы» является завершённой научно-квалификационной исследовательской работой, содержащей новые научные результаты, полученные с применением методов вычислительной математики и компьютерного моделирования, и имеющей важное значение для прикладных исследований в области физики плазмы высокой плотности энергии. Тема исследования и полученные результаты обладают несомненной новизной. Научные положения и выводы работы обоснованы в полной мере, соответствуют современным требованиям к обоснованию математических и компьютерных моделей и методов численного решения нелинейных начально-краевых задач математической физики. Результаты диссертации опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях и прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях, на научных семинарах в ведущих организациях, выполняющих исследования по вычислительной математике, математической физике и физике плазмы.

Автореферат достаточно полно отражает содержание, выводы и результаты диссертационной работы.

Общий вывод: по объему и уровню расчетно-теоретических исследований и новизне полученных результатов диссертация Ильи Павловича Цыгвинцева «Трёхмерное моделирование коротковолнового источника излучения на основе лазерной плазмы» удовлетворяет требованиям, предъявляемым действующим Положением о порядке присуждения ученых степеней, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

Рыжков Сергей Витальевич

Д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры теплофизики

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

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

E-mail: svryzhkov@bmstu.ru

+7 (499) 263-65-70

Подпись д.ф.-м.н., проф. Рыжкова С.В. заверяю:

«22» ноября 2016 г.



А. Г. МАТВЕЕВ
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

8499-263 67-69