

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию  
Луцкого Константина Игоревича

**«Широкодиапазонная модель термодинамики газовой и жидкой плазмы»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

### **Актуальность темы выполненной работы**

Диссертационная работа К.И.Луцкого посвящена построению термодинамической модели, позволяющей количественно описывать свойства вещества в экстремальном состоянии (сверхвысокие давления и огромные плотности). Задача такого описания крайне актуальна как для исследования природных процессов (например, космического масштаба), так и для изучения воздействия взрывов большой мощности, создающих ударные волны большого давления. В частности, характеристики вещества, находящегося в экстремальном состоянии (термодинамические функции давления  $P$ , энергии  $E$ , энтропии  $S$  и другие), входят в коэффициенты уравнений, которые используются для численного моделирования подобных процессов. Экспериментальное получение этих характеристик очень дорого, поэтому создание надежной базы данных термодинамических свойств вещества является современной до конца не решенной задачей. Соответственно, исследования, направленные на определение и уточнение термодинамических свойств вещества в экстремальном состоянии, активно ведутся в различных научных институтах России и мира.

В этом контексте, получение экстремальных характеристик вещества из «первых принципов», проведенное в работе, представляется чрезвычайно интересным и актуальным.



## Общая методология и методика исследования

В основе диссертации лежит построение согласованного широкодиапазонного уравнения состояния плазмы. Отдельно рассматриваются модели жидкой и газовой плазмы.

В области газовой плазмы выбрана модель, основанная на уравнениях Саха. В модель внесены коррективы, позволяющие существенно улучшить учет взаимодействия зарядов. Это позволило обобщить уравнения Саха на нулевую температуру, и тем самым распространить модель на холодное сильно разреженное вещество.

В области жидкой плазмы для расчета вклада электронов используется модель Томаса-Ферми с квантовой и обменной поправками (ТФП). Здесь центральное место работы занимает новый эффективный способ решения уравнений этой модели. Вместо применения традиционного для этой задачи метода стрельбы, на последовательности вложенных сеток решается соответствующая краевая задача. Это позволяет, во-первых, сделать счет более устойчивым, (так как исходная задача Коши является жесткой), а во-вторых, эффективно контролировать точность при помощи оценки по Ричардсону. Скорость вычислений при этом также существенно возрастает.

Для получения единого широкодиапазонного приближения предложен новый оригинальный метод склейки моделей, сохраняющий строгую термодинамическую согласованность. Идея метода заключается в корректной склейке термодинамического потенциала (свободной энергии), с последующим получением из нее остальных термодинамических функций. Кроме того, предложены методы интерполяции рассчитанных результатов на основании метода двойного базиса Фурье, показана высокая эффективность такой интерполяции.

Наконец, автором представлен пакет программ, позволяющий для широкого набора веществ ( $Z < 103$ ) проводить расчет термодинамических таблиц и их аппроксимаций, а также главных ударных адиабат.

## Степень обоснованности и достоверности

Основные результаты диссертационной работы связаны с физическим улучшением моделей, разработкой численных методов и составлением программного комплекса.



Физическая достоверность моделей подтверждается сравнением с экспериментальными данными по ударному сжатию металлов. Помимо этого, в области жидкой плазмы используются модели, хорошо зарекомендовавшие себя ранее. В области газовой плазмы используются справочные данные высокой надежности о потенциалах ионизации.

Математическая достоверность подтверждается фундаментальными теоремами о сходимости расчетов на сгущающихся сетках. Для построенных аппроксимаций доказаны теоремы о сходимости полученных разложений.

Положения, выносимые на защиту, прошли апробацию на научных конференциях, семинарах институтов РАН, опубликованы в 9 печатных работах в ведущих математических журналах, входящих в перечень ВАК.

### **Научная новизна полученных результатов**

#### **В области численных методов**

1. Построен новый специализированный алгоритм для решения уравнений модели Томаса-Ферми с обменной и квантовой поправками. С его помощью значительно повышается устойчивость и скорость счета, используются расчеты на сгущающихся сетках с уточнением по Ричардсону.
2. Разработаны специализированные алгоритмы вычислений специальных функций Ферми-Дирака полуцелого индекса и вспомогательной интегральной функции Ферми-Дирака. Таким образом, достигаемая точность (не хуже 14 верных знаков) перекрывает потребности практики.
3. Развита общематематический метод аппроксимации гладких непериодических функций рядами Фурье. Исследована его обусловленность и определены оптимальные параметры метода, произведено обобщение на двумерный случай, произведено обобщение на случай неравномерных сеток.

#### **В области математического моделирования**

1. В модели газовой плазмы предложено новое краевое условие на границе атомной ячейки. Это расширило область применимости модели в сторону высоких плотностей и низких температур.
2. В модели жидкой плазмы предложена модификация модели осциллирующих ядер, повышающая физическую точность модели.

