

Отзыв научного руководителя  
о диссертационной работе Луцкого К. И.  
«Широкодиапазонная модель термодинамики  
газовой и жидкой плазмы»,  
представленной к защите на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 05.13.18 — математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ.

Современные установки и конструкции новейшей техники используют вещества в экстремальных состояниях — при высоких температурах и огромных плотностях. Для их расчета применяют уравнения газовой динамики. Математическая точность решения даже трёхмерных задач на суперкомпьютерах доходит до 1%. Однако коэффициентами уравнений газодинамики являются термодинамические функции веществ. Их нахождению с точностью 1% посвящена данная диссертация.

Особое внимание уделено термодинамической согласованности различных функций. Нарушение этого требования зачастую приводит к появлению нефизических эффектов в газодинамических расчетах. В диссертации проанализирована фазовая диаграмма в переменных  $T$  и  $\rho$ .

Выбраны две модели, области применимости которых покрывают большую часть плоскости, а границы их применимости смыкаются. Это модель ионизационного равновесия для состояния газовой плазмы и модель Томаса-Ферми с квантовой и обменной поправками (ТФП) для жидкой плазмы.

У модели газовой плазмы выявлено слабое место — поправка на взаимодействие зарядов. Предложена новая модель такой поправки, основанная на новом типе краевого условия, в котором граница ячейки считается заземленной сферой. Найдено точное решение этой модели, качественно напоминающее известных моделей однородного электронного газа и Дебая. Однако количественные результаты существенно иные, уменьшающие вклад взаимодействия.

Построенная модель верифицирована, путём расчета степени ионизации при  $T \rightarrow 0$ . Она воспроизводит явление ионизации холодным сжатием. Кривая ионизации содержит оболочечные скачки, которые в среднем

воспроизводят модель ТФП. Это позволило расширить область применимости модели ионизационного равновесия в сторону сверхвысоких плотностей и низких температур. Была надежно определена нижняя граница применимости модели.

Для жидкой плазмы диссертант опирался на модель ТФП. При этом он уточнил вклад колебаний ядер в термодинамику. Это позволило определить верхнюю границу применимости модели ТФП. Оказалось, что эта граница практически совпадает с нижней границей применимости модели ионизационного равновесия. Это позволило "склеивать" указанные модели правильнее, чем это сделано в известной библиотеке SESAME (Лос-Аламос).

Для модели ТФП узким местом являлось медленность алгоритмов расчета. Диссертант предложил и разработал новый алгоритм решения уравнений модели ТФП. Вместо метода стрельбы, он использовал разностные схемы с нахождением сеточного решения методом дополненного вектора. Это в десятки раз ускорило алгоритм и одновременно сделало его гораздо более устойчивым, так как исходные дифференциальные уравнения были жесткими и стрельба для них недостаточно устойчива.

Для объединения моделей газовой и жидкой плазмы диссертант разработал метод сохраняющий термодинамическую согласованность давления, энергии и энтропии. Это нетривиальный метод, применимый не к любым моделям. Это единое уравнение состояние диссертант использовал для разработки алгоритма вычисления ударных адиабат. В качестве примера он рассчитал ударные адиабаты Al, Fe, Cu, Pb, и проанализировал их осцилляции, обусловленные внутренними оболочками атомов.

Описанные результаты позволяют оперативно рассчитывать подробные таблицы термодинамических функций и характерные кривые даже на портативных компьютерах. Однако для непосредственного использования в газодинамических методиках это недостаточно быстро. Необходимы аппроксимирующие формулы. Поэтому диссертант разработал два метода аппроксимации непериодических функций рядами Фурье и нашел оптимальные параметры этих методов. Этими методами он аппроксимировал двумерные таблицы для модели ТФП с математической точностью  $\sim 0.1\%$ . (Это примерно в 10 раз лучше их физической точности.)

Все предложенные схемы и алгоритмы доведены до четко написанных программ, образующих программный комплекс, на языке C++ с визуализацией в среде Matlab. Это позволяет непосредственно применять результаты диссертации в любых организациях.

В процессе работы К. И. Луцкий проявил много инициативы и само-

стоятельности. Все новые результаты, вынесенные на защиту, получены соискателем самостоятельно и опубликованы в журналах Перечня ВАК.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК по специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а ее автор, Луцкий Константин Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Научный руководитель,  
член-корреспондент РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

Н. Н. Калиткин

Подпись Н. Н. Калиткина заверяю:  
ученый секретарь ИПМ им. М. В. Келдыша  
РАН  
кандидат физико-математических наук

А. И. Маслов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.