

## ОТЗЫВ

официального оппонента

**Игнатова Александра Михайловича**

на диссертационную работу **Мартыновой Инны Александровны**  
**«Расчетно-теоретическое исследование термодинамических свойств комплексной плазмы»** на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Диссертационная работа Мартыновой И.А. состоит из введения, 4 глав, заключения, словаря терминов и списка литературы. Общий объем диссертации 112 страниц, в том числе 52 рисунка. Список литературы включает 104 наименования на 12 страницах.

Диссертационная работа соответствует специальности 01.04.08 – «Физика плазмы». По результатам работы имеется 9 статей в журналах, рецензируемых ВАК, опубликовано 14 докладов и 21 тезис докладов в сборниках трудов конференций.

Диссертация посвящена расчетно-теоретическому исследованию термодинамических свойств классической трехмерной комплексной плазмы.

В данной работе были поставлены следующие задачи: изучение характеристик плавления и полиморфного перехода между различными кристаллическими решетками как фазовых переходов первого рода; учет эффектов нелинейного экранирования в комплексной плазме в рамках приближения средней сферической ячейки Вигнера-Зейтца; модификация схемы расчета термодинамики комплексной плазмы в приближении корреляционной полости путем учета нелинейности экранирования макроиона; изучение термодинамики комплексной плазмы с двумя сортами макроионов.

**Содержание работы.** Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и приведена научная новизна исследований, описана научная и практическая значимости полученных результатов и представлены выносимые на защиту научные положения. В главе 1 приведен обзор основных работ, использованных в диссертации. Глава 2 посвящена оценке величины скачка плотности при плавлении, отсутствующего в результатах моделирования фазовой диаграммы комплексной плазмы однокомпонентной системы Юкавы. Также вторая глава посвящена перестроению и изучению фазовой диаграммы в переменных температура – концентрация – давление. Глава 3 посвящена проблеме термодинамической устойчивости и фазовых переходов в двухкомпонентной комплексной плазме. Одним из наиболее важных



результатов глав 2 и 3 является, на мой взгляд, то, что исходная фазовая диаграмма существенно неполна и не отражает возможность фазовых расслоений с заметным, или даже существенным скачком плотности типа флюид-флюид и кристалл-флюид из-за искусственного ограничения только изохорическими переходами. В главе 4 рассмотрено влияние эффекта нелинейного экранирования на параметры двухкомпонентной комплексной плазмы, ее положение на фазовой диаграмме и термодинамику системы. Словарь терминов поясняет смысл некоторых используемых физических терминов. В заключении приведены основные результаты, полученные в настоящей работе.

Основными результатами работы являются:

1) Перестроение фазовой диаграммы однокомпонентной системы с фиксированным (не дебаевским) потенциалом Юкавы в термодинамические переменные температура–концентрация с выделением ключевых точек, предельных асимптотик и аппроксимаций. Перестроение кривой плавления однокомпонентной системы с фиксированным потенциалом Юкавы в переменные температура–давление.

2) Теоретическая оценка величины скачка плотности вдоль всей границы плавления исходной фазовой диаграммы и получение аналитической зависимости скачка плотности на границе плавления от параметров  $\kappa$  и  $\Gamma$  на этой кривой. Максимальный скачок плотности составил около 10%. Анализ выполнения закона Симона для границы плавления и выявление отличий между полученными зависимостями давления в системе от температуры и этим законом.

3) Перестроение фазовой диаграммы однокомпонентной плазмы макроионов с экранированным (дебаевским) потенциалом, зависящим от температуры и концентрации фоновых микроионов в термодинамические переменные температура–концентрация. Получение полосатой структуры фазовых состояний в плоскости  $n_Z-T_Z$  и выявление нефизичности флюидного состояния в пределе  $T_Z \rightarrow 0$  и  $n_Z \rightarrow \infty$ .

4) Расчет профиля самосогласованного потенциала и пространственного распределения микроионов в рамках модели средней сферической ячейки Вигнера–Зейтца в приближении Пуассона–Больцмана.

5) Выявление и расчет сдвигов фазовых границ плавления и перехода между двумя кристаллическими решетками исходной диаграммы на основе введения понятий эффективного заряда макроиона и разделения микроионов на свободные и связанные.



6) Расчет границ неустойчивости относительно самопроизвольного распада флюидного состояния системы на фазы разной плотности с учетом некоторых уравнений состояния.

7) Модификация линеаризованной схемы расчета самосогласованного потенциала и профиля микроионов в двухкомпонентной асимметричной комплексной плазме в приближении корреляционной полости с использованием численного решения приближения Пуассона–Больцмана.

8) Расчет энергии кулоновского взаимодействия асимметричной комплексной плазмы в рамках построенной модификации приближения корреляционной полости. Рассчитанная энергия существенно отличается от полученной в линеаризованном (дебаевском) приближении корреляционной полости.

9) Расчет эффекта изохорического смещения двух сортов макроионов в приближении смеси средних сферических ячеек Вигнера–Зейтца с учетом эффектов нелинейного экранирования по Пуассону–Больцману.

**Актуальность работы.** Работа посвящена изучению термодинамики и, в частности, возможных фазовых переходов в комплексной плазме. Это направление в настоящее время имеет большое значение в сфере фундаментальной и прикладной науки для коллоидной плазмы, плазмы электролитов, межпланетных и межзвездных облаках и др. Актуальность работы также обусловлена растущим интересом к изучению комплексной плазмы с двумя и более сортами макрозарядов.

**Научная новизна.** Впервые теоретически оценен скачок плотности вдоль всей границы плавления, рассчитанной ранее на фазовой диаграмме системы с потенциалом Юкавы. Впервые высказано предположение и показано, что положение границ фазового состояния равновесной электронейтральной резко-асимметричной классической двухкомпонентной системы на фазовой диаграмме комплексной плазмы определяется эффективным зарядом макроиона и его экранированием только свободными микроионами, а не исходным зарядом макроиона и экранированием всеми микроионами. Впервые проведена модификация схемы расчета термодинамики двухкомпонентной комплексной плазмы в приближении Дебая–Хюккеля в корреляционной полости путем учета нелинейности экранирования макроиона в этой полости. Опираясь на результаты расчета нелинейного экранирования в приближении средних сферических ячеек Вигнера–Зейтца для одного сорта макроионов, впервые обобщена теория нелинейного экранирования на случай смеси двух сортов макроионов одним сортом микроионов.



**Теоретическая и практическая значимости работы.** Теоретическая значимость состоит в изучении влияния эффекта нелинейного экранирования на термодинамику и положение фазового состояния на фазовой диаграмме комплексной плазмы, а также в изучении термодинамики мало исследовавшейся ранее комплексной плазмы с двумя сортами микроионов и макроионов. Практическая значимость состоит в выработке рекомендаций для проведения экспериментальных исследований свойств трехмерной комплексной плазмы, в том числе уточнения характерного диапазона положений системы на фазовой диаграмме комплексной плазмы. Результаты диссертации могут быть рекомендованы для использования в следующих организациях: ОИВТ РАН, ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, ИПХФ РАН, Курчатовский институт, Исследовательский центр им. М.В. Келдыша и др.

**Апробация работы.** Результаты докладывались более чем на 35 конференциях различного уровня.

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка полученных результатов к публикациям проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены автором лично.

### **Замечания.**

1. При учете эффекта нелинейного экранирования макроионов в асимметричной плазме концентрация микроионов вблизи границы макроиона при некоторых параметрах может оказаться достаточно высокой, в связи с чем в этом случае необходимо учитывать влияние корреляций микроионов друг с другом на равновесный профиль микроионов.

2. Заряд макроионов в работе считается фиксированным. Для коллоидных растворов это предположение выполняется с хорошей точностью. Однако в других перечисленных в диссертации примерах комплексной плазмы заряд макроионов может зависеть от состояния среды. Это обстоятельство следовало бы учитывать.

3. В формуле (5) автореферата и формуле (4.22) диссертации есть одна и та же опечатка в выражении для эффективного структурного параметра  $\kappa$ . Дебаевский радиус должен стоять в знаменателе, а не в числителе.

### Закключение.

Все перечисленные замечания не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Мартынова И.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Отзыв составил

д.ф.-м.н., профессор,  
главный научный сотрудник  
теоретического отдела ИОФ РАН



Игнатов А.М.

Контактные данные официального оппонента

Игнатова Александра Михайловича:

Телефон: +7(499) 503 87 77 (доб. 7-47),

e-mail: aign@fpl.gpi.ru

место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

(ИОФ РАН), 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д.38,

Телефон: +7 (499) 503-87-34

Факс: +7 (499) 503-87-23

e-mail: office@gpi.ru

ПОДПИСЬ Игнатова А.М.  
ЗАВЕРЯЮ  
СЕКРЕТАРЯ ИОФ РАН, д.ф.-м.н.  
Глушков В.В.  
ВРИО ученого  
Подпись Глушков В.В.  
20.09.2019г.

