

## ОТЗЫВ

*официального оппонента*

*Дубинова Александра Евгеньевича*

*на диссертационную работу Мартыновой Инны Александровны*

*«Расчетно-теоретическое исследование термодинамических свойств комплексной плазмы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – "Физика плазмы"*

Диссертация Мартыновой Инны Александровны **«Расчетно-теоретическое исследование термодинамических свойств комплексной плазмы»**, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы», содержит следующие разделы: введение, 4 главы, заключение, словарь терминов и список литературы. Она изложена на 112 страницах текста, содержит 52 рисунка, список литературы из 104 наименований, в который входят и собственные публикации автора. Автореферат диссертации изложен на 18 страницах, содержит 7 рисунков, список литературы из 10 наименований, а также список основных публикаций автора из 11 наименований.

Работа относится к физике комплексной плазмы и соответствует заявленной специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

**Содержание работы.** Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, отмечена новизна и практическая значимость работы, указан личный вклад автора, апробация и публикации, сформулированы 5 защищаемых положений, кратко изложено содержание диссертации. В гл. 1 представлен обзор литературы по теме диссертации, из которого следует, что ее автор хорошо представляет современное состояние вопроса. В гл. 2 приведены результаты теоретических исследований фазовой диаграммы однокомпонентной системы Юкавы. В гл. 3 рассмотрены границы термодинамической устойчивости и фазовые переходы в двухкомпонентной плазме. В гл. 4 рассмотрены особенности нелинейного экранирования и его влияние на термодинамику плазмы. В заключении даны общие выводы по диссертации.

**Актуальность темы** диссертации обусловлена существующем в мире большим научным интересом к физическим свойствам комплексной плазмы, а также быстрым расширением сферы их научных и технологических приложений в различных областях таких, как космические околопланетная или околокометная плазма, плазма технологических установок обработки материалов, плазма электролитов и коллоидных систем, и др.

**Целями диссертационной работы И.А. Мартыновой являлись:**

1. Получение новых расчетно-теоретических данных о характеристиках плавления и полиморфного перехода между различными кристаллическими решетками как фазовых переходов первого рода с учетом эффектов нелинейного экранирования в комплексной плазме в рамках приближения средней сферической ячейки Вигнера-Зейтца.
2. Модификация известной схемы расчета термодинамики комплексной плазмы в приближении в корреляционной полости путем учета нелинейности экранирования макроиона.
3. Получение новых расчетно-теоретических данных о термодинамических свойствах комплексной плазмы с двумя сортами макроионов.

**Научная новизна.** В работе впервые теоретически оценен скачок плотности вдоль всей границы плавления, 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 («голым») 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.

**Научная и практическая значимости** заключаются в изучении влияния эффекта нелинейного экранирования на термодинамику и положение фазового состояния на фазовой диаграмме комплексной плазмы, а также в изучении термодинамики мало исследовавшихся ранее системах комплексной плазмы с двумя сортами микро- 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 исследований автора можно отнести к фундаментальным, вместе с тем они могут быть учтены при разработках плазменных установок с конденсированной дисперсной фазой в организациях РАН, Росатома РФ.

Результаты диссертационной работы И.А. Мартыновой представлены в **положениях, выносимых автором на защиту:**

1. Фазовая диаграмма однокомпонентной системы с потенциалом Юкавы в переменных температура–концентрация и кривая плавления указанной системы в

переменных температура–давление. Теоретическая оценка величины скачка плотности и анализ выполнения закона Симона для границы плавления.

2. Полосатая структура фазовой диаграммы в переменных концентрация–температура для зон кристаллического и флюидного состояний однокомпонентной плазмы макроионов с экранированным дебаевским потенциалом.
3. Расчет в приближении Пуассона–Больцмана профиля самосогласованного потенциала и распределения микроионов для модели средней сферической ячейки Вигнера–Зейтца. Сдвиг фазовых границ плавления и полиморфного перехода на исходной фазовой диаграмме на основе разделения микроионов на свободные и связанные и соответствующей перенормировки эффективного (видимого) заряда макроиона.
4. Расчет границ термодинамической неустойчивости асимметричной комплексной плазмы относительно самопроизвольного распада системы на фазы разной плотности в известных из литературы приближенных уравнениях состояния. Сравнительный анализ полученных границ с известными результатами прямого численного моделирования методом Монте-Карло асимметричной дебаевской системы и асимметричной системы заряженных твёрдых сфер и результирующая неполнота фазовой диаграммы комплексной плазмы.
5. Учет нелинейного экранирования и модификация линеаризованной схемы приближения корреляционной полости расчета с использованием численного решения уравнения Пуассона–Больцмана в двухкомпонентной асимметричной комплексной плазме. Расчет термодинамики комплексной плазмы в рамках построенной модификации.

Основное достоинство диссертации, на мой взгляд, заключается в последовательном и подробном изложении развитой автором теории термодинамических свойств комплексной плазмы. Так, установление полосатой структуры фазовой диаграммы в переменных концентрация–температура для зон кристаллического и флюидного состояний однокомпонентной плазмы макроионов с экранированным дебаевским потенциалом можно отнести к разряду изящных результатов.

Диссертация написана ясным языком на высоком научном уровне, хорошо иллюстрирована. Результаты работы являются новыми, они многократно апробированы на конференциях различного уровня и достойно представлены публикациями в журналах, рекомендованных ВАК. Все защищаемые положения доказаны.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

К **замечаниям** по работе можно отнести следующие.

1. На стр. 14 диссертации указано, что «Понятие «комплексная плазма» традиционно используется для обозначения целого семейства объектов и включает в себя несколько различных видов асимметричной по заряду плазмы. Среди них есть коллоидная плазма,

термически равновесная плазма с конденсированной дисперсной фазой (КДФ-плазма), газоразрядная пылевая плазма и пылевая плазма серебристых облаков, и другие. В данной работе все эти виды плазмы будут рассматриваться...». Вместе с тем, в диссертации рассмотрены только 1-компонентная система Юкавы (п. 2.1), 2-компонентная система «макроион-микроион» (п. 2.2, гл. 3, 4) и 3-компонентная система (2 сорта макроионов одного знака заряда и 1 сорт микроиона с противоположным по знаку заряда) (п. 4.4). Пылевая же плазма, являющаяся 3-компонентной системой (пылинки, ионы и электроны), в работе осталась не рассмотренной

2. На стр. 14 приведены типичные параметры пылевой плазмы: «...концентрация макроионов  $n_Z \sim 10^3\text{--}10^9 \text{ см}^{-3}$ , абсолютное значение зарядового числа (далее будем называть его зарядом) макроиона  $Z \sim 10^3\text{--}10^4$ , температура макроионов  $kT_Z \sim 1\text{--}2 \text{ эВ}$  ( $k$  – константа Больцмана), температура положительно заряженных микроионов  $kT_i \approx 0,03 \text{ эВ}$ , температура электронов (отрицательно заряженных микроионов)  $kT_e \sim 1\text{--}7 \text{ эВ}$ , радиус макроиона  $R_Z \sim 1\text{--}100 \text{ мкм}$ ...». Непонятно происхождение столь высокого значения температуры пылинок, которая заметно превышает температуру ионов. Где источник энергии для пылинок?

3. Использование нестандартной терминологии несколько затрудняет понимание диссертации. Например, в содержании п. 4.4 озаглавлен: Термодинамика изохорического **смещения** в комплексной плазме с двумя сортами макроионов. Непонятно, что обозначает термин **смещение**. Он многократно использован в диссертации. И только в середине п. 4.4 узнаем, что речь идет о перемешивании компонентов при слиянии элементарных ячеек. Следовало бы использовать термин «смешивание», т.к. термин «смещение» образован от другого глагола.

Однако изложенные здесь замечания не умаляют теоретических и практических результатов диссертации и той высокой оценки, которую она заслуживает.

Оценивая диссертационную работу И.А. Мартыновой в целом, следует заключить, что автором выполнен большой объем весьма сложных и трудоемких расчетов, в результате которых был получен ценный научный материал. Представленная работа имеет неоспоримую научную и практическую ценность.

Диссертация И.А. Мартыновой удовлетворяет требованиям п. 9 Положения "О порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в ред. 01.10.2018), т.к. она представляет собой завершующую научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно классифицировать как решение задачи, имеющей существенное значение для физики плазмы, а именно – получены новые расчетно-теоретические данные о термодинамических характеристиках комплексной плазмы.

Учитывая актуальность, высокий научный уровень, новизну, достоверность полученных результатов и их практическую ценность, следует заключить, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Мартынова Инна Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 «Физика плазмы».

Отзыв составил

заместитель директора НПЦФ

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по НИР,

доктор физико-математических наук, доцент

Дубинов Александр Евгеньевич

ФГУП

«Российский Федеральный Ядерный Центр –

Всероссийский научно-исследовательский

институт экспериментальной физики»,

607188, Нижегородская обл., г. Саров,

пр. Мира, 37,

тел. (83130)42144

[dubinov@ntc.vniief.ru](mailto:dubinov@ntc.vniief.ru)

Подпись Дубинова А.Е. заверяю

Директор НТЦФ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

член-корреспондент РАН,

доктор физико-математических наук



Селемир Виктор Дмитриевич