



.....ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТРОИЦКИЙ ИНСТИТУТ ИННОВАЦИОННЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

(АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)

Адрес: 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушковых, владение 12, Телеграф/телекс: 206178 LINER-RU

Телеграф: г. Москва, г. Троицк, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Телефакс: +7(495) 841-57-76; E-mail: liner@triniti.ru; WEB-сервер: www.triniti.ru

ОКПО: 08624272; ОГРН: 1157745176400; ИНН/КПП: 7751002460/775101001

25. 11. 19 № 226/10/2819

на № от

“УТВЕРЖДАЮ”

Генеральный директор  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,  
доктор технических наук  
Д.В. Марков  
25 ноября 2019 г.



## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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”

Диссертационная работа посвящена исследованию термодинамических свойств пылевой или, как все чаще ее называют в последние годы, комплексной плазмы. В такой плазме легко достигаются высокие значения параметра неидеальности, а также возможно получение оптическими методами данных о координатах и скоростях движения пылевых частиц, что позволяет проводить экспериментальные исследования на кинетическом уровне. Все это делает данный объект удобной лабораторией для изучения неидеальной плазмы и физики фазовых переходов. В диссертации И. А. Мартыновой решались 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 известной схемы расчета термодинамических характеристик комплексной плазмы в приближении корреляционной полости путем учета нелинейности экранирования макроиона; изучение термодинамики комплексной плазмы с двумя сортами макроионов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, словаря терминов и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 112 страниц и содержит 52 рисунка. Список литературы включает 104 наименования.

В главе 1 приведен краткий обзор основных работ, используемых в диссертации, среди которых работы, посвященные прямому численному моделированию фазовых переходов в дебаевской плазме и в двухкомпонентной асимметричной плазме заряженных твердых шаров. Рассмотрены некоторые уравнения состояния комплексной плазмы, предложенные в литературе. Вводятся понятия “потенциал Юкавы”, в котором радиус экранирования не зависит от параметров плазмы, и “потенциал Дебая”, в котором радиус экранирования является функцией температуры электронов и ионов и их концентрации.

Вторая глава посвящена анализу причин явного несоответствия общей структуры фазовой диаграммы в различных работах, а также оценке величины скачка плотности при плавлении. Для этой цели исходная фазовая диаграмма в переменных параметр неидеальности ( $\Gamma$ ) – структурный параметр ( $\kappa$ ) перестраивается в разделе 2.1 в термодинамические переменные температура – концентрация. Выделены ключевые точки и линия максимальной плотности существования фазы ГЦК, а также рассчитаны асимптотики кривой плавления, когда радиус ячейки Зейтца-Вигнера значительно превышает дебаевский радиус и когда заметно меньше его. Далее кривая плавления однокомпонентной системы с потенциалом Юкавы перестроена в переменные температура – давление с использованием уравнения состояния, полученной из уравнения Орнштейна-Цернике в гиперцепном приближении. Для этого представления проанализировано выполнение закона Симона. Главным результатом раздела 2.1 является оценка скачка плотности на границе плавления в однокомпонентной системе Юкавы на основе допущения об универсальности скачков энтропии и плотности в системах с простым отталкиванием. Приведены аналитические аппроксимации указанного скачка плотности от  $\kappa$  и  $\Gamma$  на кривой плавления. Оценки показали, что максимальное значение скачка плотности достигает 10%.

В разделе 2.2 фазовая диаграмма рассмотрена с эффективным дебаевским потенциалом, зависящим от температуры и плотности, и с экранированием только одним сортом микроионов. Отмечается, что для изотермической асимметричной комплексной плазмы с потенциалом Дебая для макроионов параметры  $\kappa$  и  $\Gamma$  уже не являются более независимыми, а связаны соотношением  $3\Gamma = \kappa^2 Z$  ( $Z$  – зарядовое число макроионов). Проанализировано, к каким изменениям на фазовой диаграммы это приводит.

В третьей главе изучается проблема термодинамической устойчивости и фазовых переходов в асимметричной комплексной плазме. В подразделе 3.1 показано, что уравнения состояния пылевой плазмы из работ S. Hamaguchi с коллегами (1997) и С.А. Храпака с соавторами (2014) приводят к появлению обширных областей отрицательного давления и отрицательной сжимаемости. делается вывод, что в рассмотренной в этих работах асимметричной комплексной плазме помимо изохорических фазовых переходов, описываемых известной фазовой диаграммой жидкость – твердое тело, возможны



дополнительные фазовые переходы с существенным скачком плотности.

В подразделе 3.2 проблема фазовых переходов проанализирована на основе работы М. Dijkstra и van R. Roij (1998), в которой рассматривалась система с очень высокой плотностью, близкой к плотности плотноупакованного ансамбля твердых шариков. Границы фазового перехода из этой работы перенесены на диаграмму жидкость – твердое тело пылевой плазмы. В подразделе 3.3 проблема фазовых переходов в комплексной плазме проанализирована на основе работы А. Hynninen и А. Panagiotopoulos (2007), в которой также исследуется система с очень высокой плотностью.

*Глава 4* посвящена изучению влияния эффекта нелинейного экранирования макроионов микроионами на параметры комплексной плазмы, положение ее фазового состояния на фазовой диаграмме и термодинамику системы. В разделе 4.1 рассмотрена двухкомпонентная система классических макроионов конечных размеров с зарядами  $Z \gg 1$  и точечных противоионов с зарядами 1.

В подразделе 4.1.1 в приближении Пуассона-Больцмана в модели средней сферической ячейки Вигнера-Зейтца с центральным макроионом рассчитан средний самосогласованный потенциал и профиль микроионов. Продемонстрировано отличие получившихся распределений потенциала и профиля микроионов от аналогичных, рассчитанных в линеаризованном приближении. В подразделе 4.1.2 предложено разделение всех микроионов на свободные и связанные. За счет связанных микроионов, локализованных вблизи макроиона, заряд последнего на средних расстояниях между макроионами фактически кажется меньше, чем он есть на самом деле. Рассчитана зависимость эффективного заряда макроиона от его реального заряда  $Z$ .

В разделе 4.2 проведена приближенная оценка влияния эффекта нелинейного экранирования на реальное фазовое состояние двухкомпонентной комплексной плазмы. В основу положено допущение, что фазовое состояние системы определяется эффективным взаимодействием макроионов на средних расстояниях между ними.

В разделе 4.3 проводится модификация предложенного в работе С.А. Храпака с соавторами в 2014 г. приближения Дебая-Хюккеля в корреляционной полости с учетом эффекта нелинейного экранирования внутри этой полости. В разделе 4.4 анализируется термодинамика изохорического смешения в комплексной плазме с двумя сортами макроионов. Рассчитывается энергетический эффект смешения средних сферических ячеек Вигнера-Зейтца, где в центре располагается макроион одного из сортов.

*В заключении* сформулированы основные результаты работы.

**Актуальность темы диссертации.** В последние годы акцент в исследованиях комплексной плазмы сместился на исследования закономерностей фазовых переходов и ее термодинамических свойств. При этом сложность из-за дальнедействующего характера кулоновского взаимодействия и высоких значений параметра неидеальности, из-за наличия двух или трех, в общем случае, подсистем с сильно (на много порядков) отличающимися масштабами характерных времен и характерных длин делает самосогласованное численное исследование комплексной плазмы практически неразрешимой задачей. Поэтому сегодня моделирование такой плазмы проводят в однокомпонентном

приближении с дебаевским потенциалом в качестве парного потенциала взаимодействия между пылевыми частицами. В этом приближении электроны и ионы плазмы участвуют только в экранировании заряда пылевых частиц, и возникает проблема учета их вклада в термодинамические функции плазмы, которая строго до сих пор не решена. Поэтому тема диссертационной работы, направленной на рассмотрение именно данной проблемы, является актуальной.

**Научная новизна работы.** В диссертационной работе впервые теоретически оценен скачок плотности при фазовом переходе жидкость – твердое тело частиц, взаимодействие которых описывается 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.

**Научная значимость работы.** Научная значимость состоит в установлении факта влияния 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 работы.** Практическая значимость состоит в выработке рекомендаций для проведения экспериментов по исследованию свойств комплексной плазмы и уточнения характерного диапазона положений системы на фазовой диаграмме комплексной плазмы. Полученные автором результаты могут быть использованы в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт”, АО “ГНЦ РФ-ФЭИ” им. А. И. Лейпунского, Национальном исследовательском ядерном университете “МИФИ”, НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына и физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова, АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”, Национальном исследовательском университете МФТИ, Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Институте Космических Исследований РАН и в других научных организациях, проводящих исследования в области физики пылевой плазмы.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на 42 международных и российских конференциях, на научных семинарах ОИВТ РАН и на секции №6 “Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования физических процессов в плазме и твердых телах” Научного совета Акционерного общества “Государ-



ственного научного центра Российской Федерации Троицкого института инновационных и термоядерных исследований”.

**Публикации.** Диссертационная работа написана на основе 46 печатных работах: 11 статей в рецензируемых журналах, 9 из которых опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 35 докладов и тезисов докладов, опубликованных в сборниках трудов конференций.

#### **Замечания и пожелания.**

По содержанию диссертационной работы Мартыновой И. А. имеются следующие замечания.

1. Требуется пояснения утверждение, что “для (безразмерной) поправки к давлению возникает неопределенность в вопросе о том, учитывать или нет в определении давления системы, как производной от свободной энергии по удельному объему, зависимость потенциала межчастичного взаимодействия (1.2) от плотности”. При вычислении как внутренней, так и свободной энергии системы должна быть учтена эта зависимость, а также переменность или постоянство числа микроионов, и никаких неопределенностей не должно возникать.
2. Не совсем понятно утверждение, что “поскольку фазовая диаграмма однокомпонентной системы Юкавы (с фиксированным радиусом экранирования) в переменных температура – концентрация получена путем перестроения фазовой диаграммы [1] в переменных  $\kappa - \Gamma$ , на ней отсутствует скачок плотности, который должен наблюдаться в фазовых переходах первого рода.” Выше в диссертации сказано, что при фазовом переходе должны быть постоянными температура, свободная энергия и давление. В двух соседних точках с разных сторон от фазовой диаграммы первые две величины равны, а давление, как справедливо написано выше, нет. Поэтому эти две точки не могут лежать на “траектории” фазового перехода и, следовательно нельзя утверждать, что скачка плотности при фазовом переходе не будет.
3. Нужно пояснить, из какого условия найдено значение третьей константы  $\varphi_1 = kT_i/e$  в общем решении уравнения Гельмгольца в конечной ячейке и в чем физический смысл этого условия. Плохое согласие распределений потенциала и концентрации ионов в ячейке Зейтца-Вигнера в рамках линеаризированной теории Дебая-Хюккеля и на основе решения уравнения Пуассона-Больцмана связано именно с этим условием, которое приводит к неравенству концентрации ионов на внешней границе ячейки Зейтца-Вигнера в этих двух подходах (см. рис. 31-35). Также не указано, каким методом решалось нелинейное уравнение Пуассона-Больцмана.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой диссертации. Полученные в ней результаты и выводы обоснованы и достоверны, что подтверждается использованием проверенных методов исследования, сравнением

полученных результатов с данными теоретических моделей и численного моделирования, доступными в научной литературе. Личный вклад Мартыновой И. А. представляется определяющим, все основные результаты диссертации получены лично ею или при ее непосредственном участии. Автореферат и опубликованные работы полно отражают содержание диссертации.

Диссертация И. А. Мартыновой представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая удовлетворяет всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Мартынова Инна Александровна, безусловно заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – *“Физика плазмы”*.

Диссертация была рассмотрена и одобрена на заседании секции №6 “Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования физических процессов в плазме и твердых телах” Научного совета Акционерного общества “Государственного научного центра Российской Федерации Троцкого института инновационных и термоядерных исследований”, протокол №9 от 14 ноября 2019 г.

Отзыв составил ведущий инженер  
АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”,  
доктор физико-математических наук



А. В. Филиппов

Подпись Филиппова Анатолия Васильевича заверяю.  
Ученый секретарь АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”,  
кандидат физико-математических наук



А. А. Ежов

