

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**СТЕНОГРАММА**

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Объединенного института высоких температур Российской академии наук  
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)  
от 27 марта 2024 г. (протокол № 3)

Защита диссертации **Апфельбаума Евгения Михайловича**  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
**«Законы подобия на основе идеальных линий и теплофизические свойства веществ  
на фазовой диаграмме жидкостей»**  
Специальность 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).  
Протокол № 3 от 27 марта 2024 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 26 человек, из них 12 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) д.ф.-м.н., профессор, академик РАН Петров Олег Фёдорович

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) к.ф.-м.н. Тимофеев Алексей Владимирович

1.	Петров О.Ф.	д.ф.-м.н., проф., академик РАН	1.3.9, техн. науки	Присутствует
2.	Андреев Н.Е.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат. науки	Отсутствует
3.	Храпак А.Г.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
4.	Тимофеев А.В.	к.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
5.	Агранат М.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.14, техн. науки	Подключен
6.	Амиров Р.Х.	д.ф.-м.н., ст.н.с.	1.3.9, физ.-мат.науки	Подключен
7.	Беляев И. А.	к.т.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
8.	Вараксин А.Ю.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф.,	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
9.	Васильев М.М.	д.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
10.	Васильев М.Н.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.14, техн. науки	Подключен
11.	Василяк Л.М.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
12.	Гавриков А.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9, техн. науки	Присутствует
13.	Голуб В.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Подключен
14.	Грязнов В.К.	д.ф.-м.н., г.н.с.	1.3.14, физ.-мат.науки	Подключен
15.	Дьячков Л.Г.	д.ф.-м.н., в.н.с.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
16.	Еремин А.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14,	Присутствует

17.	Зейгарник Ю.А.	д.т.н., старший научный сотрудник	физ.-мат.науки 1.3.14, техн. науки	Отсутствует
18.	Зеленер Б.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
19.	Зобнин А. В.	д.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
20.	Иосилевский И.Л.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
21.	Киверин А.Д.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
22.	Лагарьков А.Н.	д.ф.-м.н., проф., академик РАН	1.3.9, физ.-мат.науки	Отсутствует
23.	Левашов П.Р.	д.ф.-м.н.,	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
24.	Ломоносов И.В.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
25.	Медин С.А.	д.т.н., проф.	1.3.14, техн. науки	Подключен
26.	Норман Г.Э.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
27.	Пикуз С.А.	к.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Подключен
28.	Савватимский А.И.	д.т.н.	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
29.	Стегайлов В. В.	д.ф.-м.н., доц.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
30.	Филиппов А.В.	д.ф.-м.н., проф.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
31.	Яньков Г.Г.	д.т.н., старший научный сотрудник	1.3.14, физ.-мат.науки	Подключен

## ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации старшего научного сотрудника лаборатории 7.2 – теплофизических и кинетических свойств веществ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Апфельбаума Евгения Михайловича** на тему «Законы подобия на основе идеальных линий и теплофизические свойства веществ на фазовой диаграмме жидкостей». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Диссертация выполнена в лаборатории 7.2. – теплофизических и кинетических свойств веществ Федерального государственного бюджетного учреждения науки и Объединенного института высоких температур Российской академии наук ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, [jiht.ru](http://jiht.ru)).

### **Официальные оппоненты:**

**Потехин Александр Юрьевич** - гражданин РФ, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник сектора теоретической астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе; Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, веб сайт: [ioffe.ru](http://ioffe.ru)).

**Фомин Юрий Дмитриевич** – гражданин РФ, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник теоретического отдела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики высоких давлений им. Л.Ф. Верещагина Российской академии наук (ИФВД РАН; Россия, 142190, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, стр. 14).

**Елецкий Александр Валентинович** – гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, тел. (495) 362-7865, [phns.mpei.ru](http://phns.mpei.ru), e-mail: [eletsii@mail.ru](mailto:eletsii@mail.ru))

### **Ведущая организация:**

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН (142432 г. Черноголовка, г.о. Черноголовка, Московская обл., проспект акад. Семенова, д.1, тел.: (916) 064-3529, [icp.ac.ru](http://icp.ac.ru), e-mail: [office@icp.ac.ru](mailto:office@icp.ac.ru))

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Потехин А.Ю; д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Фомин Ю. Д.; профессор Елецкий А. В.

## СТЕНОГРАММА

### Председатель

Добрый день, уважаемые члены совета и все присутствующие. Начинаем заседание нашего диссертационного совета. Сегодня на повестке дня диссертация Апфельбаума Евгения Михайловича. И сейчас Алексей Владимирович Тимофеев ознакомит нас необходимыми документами.

### Ученый секретарь

*(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).*

### Председатель

Есть вопросы какие-нибудь? Требуются уточнения? Если нет, тогда слово предоставляется Евгению Михайловичу Апфельбауму для изложения положений своей диссертации. Пожалуйста, Евгений Михайлович.

### Апфельбаум Е. М.

*Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Апфельбаума Е. М. прилагается).*

### Председатель

Спасибо, Евгений Михайлович. Переходим к обсуждению работы. Кто хотел бы задать вопросы? Пожалуйста, Алексей Георгиевич.

### Храпак А.Г.

Евгений Михайлович, вот исследование идеальных линий для систем с чисто отталкивательными потенциалами такими как, например, твёрдые сферы или система Вика -Чендлера -Андерсона имеет ли смысл? Исследовали ли вы этот вопрос?

### Апфельбаум Е. М.

Да, у меня не было времени сказать, что линия  $Z=1$  существует только систем с притяжением. Это я проверил ещё в самом начале своей деятельности. Но есть и другие физические величины, для которых идеальные линии существуют и в чисто отталкивательных системах. Так что такие исследования возможны и проводились, просто я этим не занимался.

### Председатель

Ещё вопросы, пожалуйста.

### Амиров Р. Х.

Олег Фёдорович, можно задать вопрос? Это Амиров.

### Председатель

Пожалуйста, пожалуйста.

### Амиров Р. Х.

У вас доклад был большой доклад, но вы не остановились на данных по теплопроводности плазмы. У меня вопрос следующий. Я обратил внимание, что в вашей диссертации есть зависимости для теплопроводности на изотермах. И, например, для галлия

они не монотонны, а для серебра монотонны. Есть ли какое либо простое, на пальцах, объяснений это различия?

**Апфельбаум Е. М.**

Во-первых, скажите кто вы, а то я вас не вижу.

**Амиров Р. Х.**

Это Амиров.

**Апфельбаум Е. М.**

А так вы онлайн. Тогда всё понятно. И вы спрашивали про зависимость электропроводности...

**Амиров Р. Х.**

Теплопроводности от плотности на различных изотермах.

**Апфельбаум Е. М.**

Да такая зависимость есть, и она там немонотонна и что?

**Амиров Р. Х.**

В одних случаях она немонотонна. Для галлия при низких температурах. А в других случаях монотонный рост. Качественное объяснение пальчиковое, есть - почему разная зависимость?

**Апфельбаум Е. М.**

Есть, есть. И теплопроводность и электропроводность. При низких температурах, и это не только мой результат, хотя всё зависит от конкретной модели - эти величины следуют тому как меняется состав. Когда мы начинаем сжимать плазму от очень разреженных состояний, то там начинается сильная рекомбинация, и начинают доминировать атомы. В результате электропроводность, теплопроводность и термоэдс падают. А потом начинается ионизация давлением, и они начинают расти. Всё это происходит при сравнительно низких температурах. При высоких температурах идёт обычная ионизация температурой и этого минимума нет. Но всё зависит от конкретной модели, как этот эффект проявит себя конкретно. В некоторых моделях, как в моей, он не столь явно проявляется, например, для серебра.

**Амиров Р. Х.**

Хорошо, я удовлетворён. И второй вопрос - очень часто в низкотемпературной плазме для вклада в теплопроводность вносит реактивная теплопроводность, связанная с переносом энергии ионизации. Вы делали оценки каково соотношение теплопроводности электронной, которую вы считаете, и реактивной?

**Апфельбаум Е. М.**

Давно я чего-то делал в этом направлении. Видел оценки в различных статьях. Но было бы нечестным сказать, что я точно знаю ответ на этот вопрос, но когда-то давно я это всё проделал, и в той области, где это всё работает, тот вклад, о котором вы говорите, оказался мал. Но это были очень простые оценки. Надо было, конечно, точнее оценить. Тогда бы я мог сейчас сказать, что электронная теплопроводность забьёт всё, но, пока, могу сказать, что я тогда убедился, что реактивная теплопроводность маленькая и далее не стал её считать.

**Председатель**

Хорошо, спасибо. Ещё вопросы, пожалуйста. Есть вопросы у тех, кто подключился в режиме онлайн? Так, вопросов нет, по-видимому работа хорошо известна. Тогда двигаемся дальше. Давайте следующий пункт. Алексей Владимирович, вам слово.

### Ученый секретарь

Дорогие коллеги, в деле имеется заключение организации, в которой выполнялась работа - это Объединённый Институт Высоких Температур РАН. В этом заключении и в последующих отзывах достаточно подробно описана сама работа, её суть, новизна и так далее. Если позволите я не буду повторять, так как мы слушали непосредственно доклад автора, и перейду к сути части этого отзыва. К сути - в смысле результата важного для нашего решения. Диссертация Евгения Михайловича Апфельбаума рекомендуется к защите на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Её заслушали на семинаре ОИВТ РАН под руководством академика Олега Фёдоровича Петрова, подписано секретарём семинара, кандидатом физ.- мат. наук Евгением Александровичем Лисиным.

Кроме того, в деле есть отзыв ведущей организации. Это Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН. Отзыв составил главный научный сотрудник, член - корреспондент РАН Виктор Борисович Минцев, а заверил учёный секретарь Борис Львович Психа. Очень подробно рассматривается диссертация. В подробностях расписаны все аспекты. Опять же, если позволите опущу это описание и перейду к замечаниям:

1) Текст диссертации сопровождается значительным количеством орфографических ошибок и досадных опечаток.

2) К сожалению, часть формул содержат досадные неточности, из-за которых ускользает их смысл. Так на стр. 93 приведены формулы для двух вариантов верхней границы рассматриваемого температурного диапазона, но, судя по приведенным выражениям, каждый раз верхняя граница всегда совпадает с нижней.

3) В четвертой главе автором представлен разработанный им вариант термодинамической модели на основе квазихимического подхода. Далее на основе этой модели строится расчет переносных свойств низкотемпературной плазмы. Но основным критерием применимости модели является сравнение с экспериментом и, если для коэффициентов переноса, такое сравнение представлено достаточно широко, то для термодинамических свойств, приведенных данных на наш взгляд явно недостаточно. Так, нет сравнения полученных в диссертации термодинамических результатов с обширными данными, полученными в ударно-волновых экспериментах, что на наш взгляд было бы весьма информативно.

Перечисленные выше замечания не носят принципиальный характер и не затрагивают основных результатов диссертационной работы. Изложенные в диссертации результаты достаточно хорошо обоснованы и прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях. Диссертация соответствует квалификационным требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Е.М. Апфельбаум заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Последний абзац будет повторяться дальше во всех отзывах, поэтому далее с вашего позволения я не буду его каждый раз зачитывать. Кроме этого, с вашего позволения я буду зачитывать только замечания.

На диссертацию, вернее на автореферат, получено четыре отзыва. Все положительные.

**(Первый отзыв).** Отзыв из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический

**институт** (национальный исследовательский университет)). Отзыв составлен профессором департамента молекулярной и биологической физики МФТИ, д.ф.-м.н. Ткаченко. Светланой Ивановной. Отзыв заверен учёным секретарём учёного совета МФТИ к.ф.-м.н. Евгением Григорьевичем Евсеевым. Отзыв положительный, содержит одно замечание:

1) Мне кажется, было бы полезно указать при моделировании каких процессов или оценках каких параметров при обработке экспериментальных данных были использованы результаты, полученные в диссертации. Кроме того, было бы полезно узнать, насколько полученные результаты соответствуют требованиям по размещению их в базах данных теплофизических свойств веществ.

**(Второй отзыв).** Следующий отзыв поступил из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» от профессора, доктора физико-математических наук Синкевича Олега Арсеньевича. Отзыв заверен зам. начальником управления по работе с персоналом НИУ «МЭИ» Полевой Людмилой Ивановной. Отзыв положительный, содержит два замечания:

1) В автореферате не упоминается связь представленных результатов с работами известного российского учёного Маслова В. П., хотя он занимался близкими вещами.

2) Вопрос о связи формы потенциала взаимодействия с формой идеальных линий на мой взгляд требует более детального описания.

**(Третий отзыв).** Следующий, третий отзыв получен из **Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН)** от главного научного сотрудника теоретического отдела ИОФ РАН, доктора физико-математических наук, профессора Александра Михайловича Игнатова. Отзыв заверен врио учёного секретаря ИОФ РАН д.ф.-м.н. Глушковым Владимиром Витальевичем. Отзыв положительный замечаний нет.

**(Четвертый отзыв).** Четвертый отзыв на автореферат получен из **Института теоретической физики имени Ландау РАН**, подписан доктором физико-математических наук, главным научным сотрудником, чл.-корр. РАН Иногамовым Наилем Алимовичем. Отзыв заверен учёным секретарём ИТФ Им. Ландау Крашаковым Сергеем Александровичем. Отзыв положительный, содержит четыре замечания.

1) В перечне "научная новизна" пункт 2, хорошо бы объяснить, что означают слова "Впервые на основе численного моделирования для 2х и 3х мерных систем" про 2х и 3х мерные системы."

2) В пункте 4 этого перечня нарушена грамматика "Построена химическая модель расчёта термодинамических свойств и ионного состава в области низкотемпературной плазмы и полупроводников.

3) Хорошо бы пояснить, что означают слова про геометрическое подобие. Это нормировка значений давления плотности и температуры на критические параметры? Да, далее разъяснено.

4) стр. 23. Написано " Кроме того металл не может быть представлен как однокомпонентная система во всём необходимом диапазоне плотностей, как это можно сделать для обычных газов и жидкостей." Надо бы пояснить почему. Из-за ионизации при повышенных температурах?

Все, это все отзывы и замечания, которые поступили от различных организаций.

### **Председатель**

Евгений Михайлович, вас слово для ответов на замечания, пожалуйста.

### **Апфельбаум Е. М.**

Начну я с замечаний ведущей.



Что касается замечаний по опечаткам, то я их принимаю. Сколько не чистил текст всё равно чего-то упустил.

Что касается замечания по поводу совпадения границ диапазона, то это тоже опечатка. Там опечатка в индексе у температуры. В статье, где изложена изначально эта формула был правильный индекс, но при перепечатке я ошибся.

И, наконец, замечание по сути. Это насчёт ударно-волновых экспериментов. Согласен, что сравнение с результатами ударно-волновых экспериментов было бы крайне полезным. Но те данные по таким экспериментам, которые мне удалось найти расположены за областью применимости моей модели - слишком большие плотности. Это относится даже к ударно-волновым экспериментам на пористых образцах. Об этом указано непосредственно в диссертации, тем более что там есть ссылки на эти эксперименты. В статьях, на материалах которых написана моя диссертация такое сравнение есть. Например, в статье про висмут (ссылка 37 в диссертации и автореферате) есть сравнение с экспериментом Глушака с соавторами на пористом висмуте. Наименьшая достигнутая плотность там была в 2.85 раза меньше нормальной, т.е.  $3.32 \text{ г/см}^3$ , что явно за пределами применимости нашей модели. Измеренное давление при этой плотности было 0.37 МБар. Наша модель даёт вдвое меньшее значение. В диссертации есть ссылка на одну из немногих работ, где критическая точка никеля оценивалась имен о через данные ударно-волновых экспериментов (ссылка [230]). Но там приводится критические давление и температура (без плотности). Но данная оценка получена с привлечением ряда моделей, что делает её не чисто экспериментальной. Оценка же плотностей, достигнутых в измерениях, показывает, что они находятся за пределами области корректной применимости представленной модели.

Это ответы на замечания ведущей. Теперь отвечу на замечания к автореферату. Перед тем как отвечать на вопросы к автореферату я скажу, что всё, что есть в диссертации, нельзя включить в автореферат. Этим и обусловлен ряд вопросов.

Например, Светлана Ивановна Ткаченко спрашивает насчёт того, что хорошо бы указать при моделировании каких процессов используются мои результаты. В диссертации же указано, что теплопроводность, например, серебра была посчитана именно по просьбе коллег для того, чтобы далее рассчитывать взаимодействие лазерного излучения с этим веществом. И с этого и началась этот мой этап деятельности по расчёту транспортных коэффициентов. Кроме этого для удобства практических приложений данные для висмута и индия уже зааппроксимированы полиномами (2e и 3e приложения к диссертации). Что касается баз данных, то это замечание просто принимается. Но тут нужно обратиться уже к конкретным базам данным и смотреть их требования.

Теперь замечания Олега Арсеньевича Сенкевича.

Замечание о ссылках на работы Маслова принимается, но лишь отчасти. В автореферате нельзя сослаться на все работы, на которые есть ссылки в диссертации. С работами же Виктор Павловича в этой области я и мои соавторы как раз знакомы, тем более, что он к нам первым и обратился и именно по свойствам контура  $Z=1$ . Мы с моими соавторами в наших работах ссылались на эти результаты. Не могу не отметить, что В. П. как математик выдвинул элегантную математическую идею, которая увы, "не выгорела". Он решил описать всю термодинамику полилогарифмами переменного порядка. Бозе и Ферми интегралы представляют собой частный случай полилогарифмов целого порядка, в зависимости от того какую величину мы хотим рассчитать. Но они описывают системы невзаимодействующий частиц. Нецелый же порядок по мнению В. П. должен был как раз учесть взаимодействие взамен обычных методов. Этого не случилось, но идея красивая.

На замечание от том, что вопрос о связи формы потенциала взаимодействия с формой идеальных линий на мой взгляд требует более детального описания, я отвечу, что это сделано в диссертации. Объём автореферата не позволяет перенести всю информацию из диссертации в автореферат.

И, наконец, к замечаниям Наиля Алимовича Иногамова.

На вопрос о 2х и 3х мерном моделировании я отвечаю, что это часть фразы. Новизна относится к установлению области применимости исследуемых законов подобия. Конечно же, я не первый кто осуществлял численное моделирование модельных систем. Но вот свойства идеальных линий именно в 2D случае были впервые рассмотрены именно мной. По крайней мере я не нашёл никаких соответствующих публикаций других авторов именно для 2D систем. В диссертации этот момент более подробно указан во 2й главе.

Замечания о несогласовании грамматики в одно предложении я принимаю. Это описка. Пропущено слово. Правильно "...плазмы металлов и полупроводников". В положениях, выносимых на защиту это так и сформулировано.

На вопрос об определении термина "геометрическое подобие" Наиль Алимович ответил и сам. Тем не менее, укажу, что в реферате разъяснено что "геометрическое подобие" - это сохранение геометрической формы какой-либо характеристической линии независимо от конкретной системы или вещества. Это не только относится к идеальным линиям но и, например, к закону прямолинейного диаметра.

И на вопрос о невозможности представления металла в виде однокомпонентной системы во всём диапазоне ответ следующий. Я согласен, что этот момент, возможно стоило бы расписать более подробно. И в диссертации это сделано. И да, конечно же, состав меняется при обычной ионизации (температурой при нагреве). Но ещё и при постоянной температуре, но меняющейся плотности (ионизация давлением). При  $kT \ll I$  и плотностях раз в 10 меньше нормальной металл может рассматриваться как газ атомов. А уже в окрестности линии кристаллизации - это полностью ионизованное (часто неоднократно) вещество. И учесть такие изменения в рамках одной компоненты в общем случае нельзя.

### **Председатель**

Спасибо, тогда мы переходим к оппонентам. И первый у нас Александр Юрьевич Потехин, пожалуйста.

### **Потехин А. Ю.**

*(Выступление официального оппонента не стенографируется. Положительный отзыв Потехина А. Ю. имеется в деле.)*

Заключение. Автореферат диссертации достаточно полно и вполне точно описывает содержание работы. Материалы диссертации были представлены на многих научных конференциях и опубликованы в 39 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ, в том числе большинство статей — в ведущих высокорейтинговых международных физических журналах. Несомненен определяющий вклад автора в постановку и решение задач, описанных в диссертации, причём можно отметить, что в большинстве упомянутых публикаций ЕМ. Апфельбаум является единственным автором.

Таким образом, можно с уверенностью заключить, что докторская диссертация Апфельбаума ЕМ. вносит значительный вклад в развитие теории теплофизических свойств плазмы и представляет собой законченную научноквалификационную работу, которая полностью соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней № 842 от 24.09.2013 г. в актуальной редакции, утверждённой постановлениями Правительства РФ, а автор данной диссертации Апфельбаум Евгений Михайлович заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико - математических наук по специальности 1.3.14 — Теплофизика и теоретическая теплотехника.

### **Председатель**

Спасибо, Александр Юрьевич, за подробный обзор работы. Переходим к ответам. Евгений Михайлович, вам слово.

**Апфельбаум Е. М.**

Ну, я начинаю.

Я согласен с 1м замечанием уважаемого оппонента, о параметрах разложения и значении коэффициентов, и принимаю его. Но это разложение - не мой результат и в диссертации указана ссылка на работу Ларкина, откуда и бралось это разложение, и там же указываются и условия его применимости и значения коэффициентов. Мне же было важно было показать, что независимо от конкретных значений  $a$  и  $b$  в кулоновской системе нет прямой линии  $Z=1$  даже при малых плотностях, как это следует из обычных вириальных разложений для некулоновских систем. Что и было сделано. Конкретные же значения параметров  $a$  и  $b$  представлены вот на этом слайде (показываем на слайде).

Со 2м замечанием я тоже наполовину согласен. Нужно было указать, что полная концентрация в этом выражении - это сумма концентраций всех частиц. И это усложняет переход к массовой плотности, что и продемонстрировано в следующем уравнении (4.7). Области же применимости химической модели посвящён отдельный раздел 4.5. Только поэтому она не обсуждается здесь.

Что касательно 3го замечания относительно  $O(1/2)$ , то да это следует понимать именно так как и сформулировал оппонент. В математических работах мне встречались и обозначения  $O(n)$ , где  $n$  - конкретное число. Потому и я тоже сделал так.

В ответ на 4е замечание скажу, что действительно следовало немного иначе сформулировать эту фразу. Надо было сказать, что просто приближение Дебая -Хюккеля при больших  $\gamma$  ведёт к отрицательным давлениям и поэтому его нельзя туда даже экстраполировать.

С 5м замечанием соглашусь в том, что касается стат. суммы. Для её расходимости число атомов не имеет значения. Но у меня на стр. 154 прямо упоминается, что и вводить температуру для системы из конечного числа частиц не совсем корректно (и это не мой результат). Поэтому утверждение о том, что изолированный атом, т.е. система с конечным числом частиц, не является строгой статистической системой с температурой, остаётся верным. И это, действительно, никак не связано с расходящейся стат. суммой в кулоновских системах.

С 6м замечание полностью согласен. Пропустил я эту статью. Но это сравнительно свежая работа, и только поэтому она прошла как-то мимо меня. Я же начал считать до 2020 года. Стоит ещё отметить, явного вида спицеровского множителя в этой работе нет, что затрудняет применение этих результатов в других моделях. Тем не менее, конечно, стоило проверить и метод, предложенный авторами этой работы.

С 7м замечанием я тоже согласен. Следовало бы добавить пояснение о модификации вклада состояний непрерывного спектра. И вообще, возможно, обсудить этот вопрос более подробно. Это, кстати, делается в моих статьях, там есть ссылки и на статьи, на которые указал уважаемый оппонент.

В ответ на 8е замечание соглашусь только с тем что у меня приведена не совсем точная формулировка. Следовало бы написать, что, если рассматривать 4.25 как феноменологическое уравнение, то оно с успехом используется в тех областях, где приближение парных столкновений, а с ним и классическое уравнение Больцмана, уже не

работает. И при этом время  $\tau$  вычисляется, конечно же, иначе, чем через парное сечение рассеяния. Имелось ввиду только это. Хотя существуют обобщения уравнения Больцмана, например, квантовое уравнение Больцмана, из которого получается формула Займана для проводимости жидких металлов, есть области, где никакой вариант уравнения Больцмана уже не применим. У меня там, в диссертации, есть ссылка на работу, где формула Кубо-Гринвуда выводится из приближения времени релаксации, предполагая именно феноменологический характер этого приближения. И такой вывод уже нельзя сделать из любого варианта уравнения Больцмана.

9е замечание об опечатке в формуле просто принимается.

Всё, спасибо за внимание.

### **Председатель**

Спасибо, Евгений Михайлович. Переходим к отзыву следующего оппонента. Юрий Дмитриевич, вам слово.

### **Фомин Ю. Д.**

*(Выступление официального оппонента не стенографируется. Положительный отзыв Фомина Ю.Д. имеется в деле)*

Заключение. Указанные замечания не являются существенными и не снижают общую высокую оценку работы, которая представляет собой научное исследование, существенно углубляющее понимание теплофизических свойств различных фаз вещества. Решена важная научная задача – построение идеальных линий большого количества систем и установление их универсального характера. 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 Апфельбаум Евгения Михайловича заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

У меня все.

### **Председатель**

Спасибо большое, Юрий Дмитриевич. Слово предоставляется Евгению Михайловичу для ответа на замечания.

### **Апфельбаум Е. М.**

Спасибо за замечания, постараюсь на них ответить.

Я отчасти соглашусь с 1м замечанием. Следовало бы более чётко сформулировать. Но сначала замечу, что асимптотическое свойство бинодали, т. е. то что линия  $Z=1$  является касательной к ней при низких температурах, это не утверждение, а доказанное свойство. Причём подробное доказательство содержится ещё и в работах Филлипова, на которые я ссылался как в статьях, так и в диссертации. И из этого следует общий принцип применения этой асимптотики: каково бы не было уравнение, описывающее жидкую ветвь бинодали, оно должно обладать этой асимптотикой. Т.е. надо экстраполировать не экспериментальные данные, а теоретическую зависимость. В нашем случае это и заложено в построенном интерполяционном уравнении. Кроме этого, это же свойство использовалось мною для определения коэффициентов в 3х-членном уравнении Гаггенхейма.

В ответ на второе замечание укажу, что все вещества, рассмотренные в 1й главе, собраны и перечислены в приложении "А" диссертации вместе с их характеристическими

параметрами. Надо было бы добавить к этому рисунку фразу "Конкретные вещества, входящие в различные группы, перечислены в приложении А диссертации", что сняло бы этот вопрос.

3е замечание касается возможности применения представленных в диссертации методов для определения бинодалей селена, кремния, теллура. Это замечание отчасти принимается. Но до всех таких систем не дошли руки. Что касательно перечисленных здесь жидких металлов и полупроводников, то их фазовая диаграмма находится слишком высоко по температуре, кроме, может быть селена. Поэтому имеющихся экспериментальных данных просто недостаточно, например, для кремния и для теллура бинодаль неизвестна из измерений.

4е замечания касается неоднозначности в обозначениях. Оно принимается.

5е замечание, касающееся изменения осей координат на некоторых рисунках, тоже принимается. Но замечу, что таких "неправильных" графиков всего 4 из 118.

6е замечание касается моих результатов для серы и необходимости более подробно обсудить возможность применения исследуемых законов подобия к системам с переменным составом. Это результат не был продемонстрирован во время доклада. Но он есть в диссертации. Поэтому я представлю его для ответа на замечание оппонента. Посмотрите на этот слайд (*демонстрируется слайд*). Здесь представлена фазовая диаграмма серы, полученная в эксперименте и рассчитанная с нашим интерполяционным уравнением состояния. И можно видеть хорошее согласие. Но сера обладает аллотропией, т.е. в жидкой фазе её молекула состоит из 8 атомов, расположенных в правильных восьмиугольниках. Но в окрестности критической точки она уже состоит из 2-3х атомных молекул. А в газе - просто из атомов. Наше хорошее согласие с измерениями получено для случая, когда параметры Бойля вычислялись, исходя из 8атомного состава серы. Другое число атомов в молекуле тоже приводит к прямолинейным формам линии  $Z=1$ , но ни одна из них уже не является касательной к бинодали. Таким образом, здесь ситуация аналогична тому, что далее наблюдается у металлов - в жидкости изменение состава не влияет никак (тем более, что его там практически нет). Но при переходе к более разреженным и высокотемпературным состояниям изменение состава уже оказывает существенное влияние на результаты. Так что влияние этого эффекта всё же было рассмотрено в диссертации. Но соглашусь с уважаемым оппонентом, что это следовало бы сделать более детально.

И, наконец, 7е замечание касается скачков в степени ионизации и вопроса о том не являются ли они индикатором фазового перехода. Этот результат тоже не был показан во время основного доклада. Но он есть в диссертации. И сейчас он представлен вот на этом слайде, где показана степень ионизации никеля на изотерме 10 кК в широком диапазоне плотностей (*демонстрируется слайд*). Здесь действительно есть практически вертикальные скачки. Но они связаны не с фазовыми переходами, а с тем что аппроксимации в описании взаимодействия в кулоновской составляющей в различных моделях перестают быть корректными. Точнее они заходят в область таких высоких плотностей, где их уже нельзя применять. Даваемая ими поправка на взаимодействие сравнивается или превышает потенциал ионизации соответствующей частицы. А так как их разность - потенциала и поправки - стоит в показателе экспоненты, то это очевидно приводит большим нефизичным величинам. В случае поправки Дебая - Хюккеля этот как раз и есть проявление "плохих" свойств этой модели, упомянутых в 4м комментарии А. Ю. Потехина.

Всё, я ответил.

### **Председатель**

Спасибо, Евгений Михайлович. Слово предоставляется 3му оппоненту, Александру Валентиновичу Елецкому.

### **Елецкий А. В.**

*(Выступление официального оппонента не стенографируется. Положительный отзыв Елецкого А. В. имеется в деле.)*

Заключение. Указанные замечания не снижают общую высокую оценку работы. Таким образом, рассматриваемая 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 Апфельбаум Евгений Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

### **Председатель**

Спасибо, Александр Валентинович. Вам слово для ответа, Евгений Михайлович.

### **Апфельбаум Е. М.**

Спасибо за замечания, Александр Валентинович. И вот мои ответы.

В 1м замечании вы указали на то, что в диссертации отсутствует анализ физических причин отклонения от прямолинейной зависимости у ряда веществ. Это не совсем так. Действительно, для воды и тяжёлой воды я не нашёл объяснения, почему они себя так ведут. И об этом сказано в диссертации. Но вода (тяжёлая или обычная) вообще не подчиняется практически никаким известным законам подобия. И я тоже не смог найти этому объяснения. Так что в отношении воды замечание принимается. В отношении же неона, гелия и тем более водорода в диссертации указано, что это квантовые жидкости и для них квантовые эффекты (в частности,  $P$  не равно  $nT$ ) проявляются уже при достаточно высоких температурах. Возможно стоило расписать этот момент более подробней. Наконец, метанол, этанол и винил хлорид, по-видимому, обладают эффективными потенциалами, параметры которых делают их слишком "короткодействующими" - в смысле определённом во второй главе диссертации, которая как раз и посвящена установлению связи между радиусом действия потенциала и формой идеальных линий. Показано, что для ряда веществ с прямой линией  $Z=1$  параметры их эффективных потенциалов находятся как раз в нужном диапазоне. Соглашусь, что следовало бы исследовать отдельно потенциалы для веществ с непрямой линией  $Z=1$ .

Во 2м замечании вы указали, что вывод о неустойчивости перехода жидкость-газ для слишком короткодействующих потенциалов не анализируется подробно с физической точки зрения, что оставляет у читателя вопросы о природе подобной неустойчивости. И остается неясным, насколько реальными являются системы со столь короткодействующим взаимодействием. Но это не мой результат. Я ссылаюсь на него из-за того, что линия  $Z=1$  касается бинодали при низких температурах. Потому её форма тоже должна меняться с изменением положения и формы бинодали и, соответственно, с изменением радиуса межчастичного взаимодействия. Что же касательно реальности таких систем с метастабильным испарением, то я ссылаюсь на работы Филлипа Кэмпса с соавторами (ссылки 110, 111 в диссертации), а в них в качестве реальных систем с таким эффектом указаны коллоиды и различные ионные жидкости. Так же самые экзотические взаимодействия существуют и в различных биологических системах. Так что этот эффект наблюдается во вполне реальных системах.

Наконец, в 3м замечании было указано на опечатки и описки в тексте. Это замечание просто принимается.

**Председатель**

Спасибо, Евгений Михайлович. У нас есть теперь время для дискуссий. Пожалуйста, кто хотел бы высказаться? Пожалуйста Генри Эдгарович.

**Норман Г. Э.**

Дорогие коллеги, я буду очень краток, поскольку я давно знаю Евгения Михайловича. Меня Владимир Евгеньевич пригласил вернуться в ИВТАН в 2001 году. Я попал тогда в одну лабораторию вместе с Евгением Михайловичем. Её руководителем был Михаил Фёдорович Иванова. Михаил Фёдорович тогда же посоветовал обратить внимание на Евгения Михайловича, ну тогда на Женю Апфельбаума, как на очень толкового молодого человека. Это было 23 года тому назад, когда он был, наверное, действительно молодым человеком. Поэтому вся его дальнейшая научная деятельность протекала у меня на глазах. И её результаты вы все могли видеть сегодня. Поэтому я сам буду сегодня голосовать "за" и призываю к этому и других членов учёного совета. И это моя оценка является не только моим собственным мнением, но и подтверждается, в первую очередь, положительными отзывами уважаемых оппонентов.

**Председатель**

Спасибо, Генри Эдгарович. Еще есть желающие? Пожалуйста, Павел Ремирович.

**Левашов П. Р.**

Дорогие коллеги, Евгений Михайлович показал свою квалификацию. И вы все видели насколько глубока и широка его работа. Я бы хотел три аспекта отметить: во-первых, это эрудицию Евгения Михайловича - он во многих вопросах разбирается и имеет собственное мнение, во-вторых, я хотел бы обратить внимание, что, в основном, работы сделаны им одним. У него есть работы с соавторами, но большая часть работ сделана в одиночку. Сегодня это не так часто встретишь. Ну и третий аспект, это то, что те результаты, которые он получил, в том числе и по законам подобия, они составляют серьёзный вклад в современную науку. А у нас специалистов в стране такого уровня, наверное, уже и нет. То есть Евгений Михайлович у нас один из немногих специалистов в этой области. Поэтому я призываю поддержать его работу и проголосовать за неё. Спасибо.

**Председатель**

Спасибо, Павел Ремирович. Еще есть желающие высказаться? Ну, кажется, все и так одобряют работу Евгения Михайловича. Тогда мы переходим к следующему пункту. Заключительное слово предоставляется Евгению Михайловичу.

**Апфельбаум Е. М.**

Не прошло и двадцати лет с кандидатской диссертации, как я дошёл до заключительного слова на докторской. Я не буду оригинален и выражу благодарность. Если бы я упомянул всех, то это заняло бы весь день, поэтому скажу коротко. Во-первых, я благодарен своей семье, во-вторых я благодарен группе учёного секретаря совета, которые помогли мне в оформлении документов, далее я конечно же благодарен оппонентам и всем, кто дал отзыв на автореферат. Я благодарен всем своим коллегам, которые меня поддерживали. И конечно же я не могу не вспомнить тех людей, которым я очень многим обязан, и которых с нами уже нет. Это мой научный руководитель на кандидатской Михаил Фёдорович Иванов. Это Владимир Сергеевич Воробьёв и Георгий

Александрович Мартынов, без которых я вообще бы не занялся законами подобия. Также я должен вспомнить и Александра Львовича Хомкина, который много чему научил меня в области физики неидельной плазмы, а ещё и Льва Рувимовича Фокина. Именно Лев Рувимович указал нам на проблемы с нашими законами подобия в случае кулоновских систем, что позволило связать мне обе части диссертации в единую конструкцию. Ну и чтобы не завершать на печальной ноте, я выражу благодарность и живым моим коллегам, которые, надеюсь, будут здравствовать ещё долго. Это и Алексей Георгиевич Храпак, и Павел Ремирович Левашов, Сергей Александрович Триггер, Сергей Алексеевич Шумихин и многие другие. Спасибо.

### **Председатель**

Спасибо, и мы должны перейти к голосованию. Слово предоставляется ученому секретарю.

### **Ученый секретарь**

Уважаемые коллеги! Т.к. некоторые члены совета присутствуют дистанционно, решение диссертационного совета по рассматриваемому на заседании вопросу принимается тайным голосованием по присуждению ученой степени с использованием информационно-коммуникационных технологий.

Поэтому голосуем мы на электронной платформе на сайте. Прошу всех членов диссертационного совета войти в свою учетную запись на сайте института и проголосовать. Это можно сделать на своих устройствах, или на компьютере в центре зала.

*(Проводится процедура тайного голосования)*

### **Председатель**

Уважаемые члены совета! Давайте послушаем результаты.

### **Ученый секретарь**

Уважаемые члены совета! Позвольте огласить протокол заседания комиссии. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 31 человека. Дополнительно введены члены совета – нет. Присутствовало на заседании 26 членов совета, в том числе, докторов наук по профилю рассматриваемой специальности – 11. Роздано бюллетеней – 26, осталось не роздано – 5, оказалось в урне бюллетеней – 26.

Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени доктора физико-математических наук Апфельбауму Евгению Михайловичу:  
за – **26**, против – **нет**, недействительных бюллетеней – **нет**.

### **Председатель**

Спасибо. Мы должны утвердить, а потом похлопать. Кто за? Против нет?

Воздержавшихся нет? (Протокол счетной комиссии утвержден единогласно).

Спасибо большое, поздравляем.

Переходим к обсуждению проекта заключения. Есть замечания, пожелания?

*(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).*

Если больше нет желающих обсуждать проект, тогда мы должны его проголосовать с теми замечаниями, которые были высказаны. Кто за заключение с замечаниями, которые были указаны? Кто против? Нет. Кто воздержался? Нет. Спасибо, принято единогласно.

*(Проект заключения принят единогласно).*



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01  
(Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ  
ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА  
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 27.03.2024г. № 3

О присуждении Апфельбауму Евгению Михайловичу, гражданину Российской Федерации ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Законы подобия на основе идеальных линий и теплофизические свойства веществ на фазовой диаграмме жидкостей» по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 20.12.2023 г. (протокол заседания № 18/1) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 86/нк от 26.01.2022г.

Соискатель Апфельбаум Евгений Михайлович 1975 года рождения, в 1998 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)». В 2001 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук на тему: «Численные модели широкодиапазонных электронных коэффициентов переноса металлов в жидкой и газообразной фазах» по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» защитил 25 февраля 2004 г. в диссертационном совете Д 002.110.02, созданном на базе Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории № 7.2. теплофизических и кинетических свойств веществ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории № 7.2. теплофизических и кинетических свойств веществ Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник сектора теоретической астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-Технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук Потехин Александр Юрьевич

- доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории фазовых переходов в сильно коррелированных и неупорядоченных системах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики высоких давлений им. Л.В. Верещагина Российской академии наук Фомин Юрий Дмитриевич

- доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Елецкий Александр Валентинович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской Академии Наук в своем положительном заключении, составленном членом - корреспондентом РАН, г.н.с., д.ф.-м.н. Минцевым В. Б. (утвержденном 20.02.2024 г. зам. директора д. х. н. Бадамшиной Э. Р.) указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь исследованием в ней теплофизических свойств вещества в области малодоступной как для экспериментального, так и теоретического исследования современными методами, а также к созданию эффективных подходов для получения теплофизической информации о той части фазовой диаграммы, которая характерна для металлов в состоянии низкотемпературной плазмы, расширенных металлов и металлов в околокритической и надкритической области параметров. Актуальными являются также разработка простых подходов, к каковым относятся методы, построенные на законах подобия, а также приближенные методы расчёта для плазмы металлов в рамках химического подхода, который может обеспечивать достаточно надежные результаты для области разреженных состояний металлов.

Отмечается, что в работе предложен ряд новых законов подобия на основе существующих и новых идеальных линий для различных физических величин, в определении области применимости установленных законов подобия, разработке методов

построения бинодалей жидкость-газ и построении модели расчёта теплофизических свойств металлов и полупроводников. Выше перечисленное позволило исследовать фазовые диаграммы с новыми идеальными линиями, построить кривые сосуществования для металлов, для которых они недоступны из эксперимента, получить параметры их критических точек, рассчитать термодинамические и переносные свойства ряда веществ в важнейшей области фазовой диаграммы и рассмотреть вопрос о применимости изучаемых законов подобия для многокомпонентных систем на примере низкотемпературной плазмы металлов.

Высоко оценена и теоретическая и практическая значимость работы. В частности, предложенные в работе законы подобия на основе идеальных линий имеют фундаментальное значение, так как дополняют наши знания о структуре фазовой диаграммы вещества. Построено общее уравнение для бинодали жидкость-газ и разработана методика определения параметров критических точек, что позволяет сравнительно просто применить это для тех веществ, где эксперимент, так сложные методы расчёта не позволяют этого сделать. Разработан программный код для вычисления теплофизических свойств низкотемпературной плазмы металлов. Получены данные о теплофизических свойствах низкотемпературной плазмы металлов, которые имеют широкую область применения в различных прикладных задачах, связанных с высокоэнергетическими процессами, включая задачи о взаимодействии мощных потоков частиц или излучения с веществом, построены соответствующие аналитические зависимости для применения полученных результатов в широкой области плотностей и температур.

Соискатель имеет 74 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 39 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 39 работ:

1. Apfelbaum E. M., Vorob'ev V. S., Martynov G. A. The unit compressibility factor and critical parameters of mercury // Chem. Phys. Lett. — 2005. — Vol. 413, no. 4–6. — P. 342–345.
2. Apfelbaum E., Vorob'ev V. S., Martynov G. Triangle of liquid- gas states // The Journal of Physical Chemistry B. —2006.—Т. 110, № 16.—С. 8474—8480.
3. Apfelbaum E., Vorob'ev V. Correspondence between the critical and the Zeno-line parameters for classical and quantum liquids // The Journal of Physical Chemistry B. —2009.—Т. 113, № 11.—С. 3521—3526.

4. Apfelbaum E., Vorob'ev V. The confirmation of the critical point-Zeno-line similarity set from the numerical modeling data for different interatomic potentials // *The Journal of chemical physics*. —2009.—T. 130, № 21.
5. Apfelbaum E., Vorob'ev V. Correspondence between thermodynamics of lattice models and real substances at the liquid- gas domain of the phase diagram // *The Journal of Physical Chemistry B*. —2010.—T. 114, № 30.—C. 9820—9826.
6. Apfelbaum E. Estimate of beryllium critical point on the basis of correspondence between the critical and the zeno-line parameters // *The Journal of Physical Chemistry B*. —2012.—T. 116, № 50.—C. 14660—14666.
7. Apfelbaum E., Vorob'ev V. Note: The universal relations for the critical point parameters // *The Journal of Chemical Physics*. —2013.—T. 139, № 4.
8. Apfelbaum E., Vorob'ev V. Regarding the Universality of Some Consequences of the van der Waals Equation in the Supercritical Domain // *The Journal of Physical Chemistry B*. —2013.—T. 117, № 25.—C. 7750—7755.
9. Apfelbaum E., Vorob'ev V. The similarity law for the Joule–Thomson inversion line // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2014. — T. 118, № 42. —C. 12239—12242.
10. Apfelbaum E., Vorob'ev V. The Similarity Relations Set on the Basis of Symmetrization of the Liquid–Vapor Phase Diagram // *The Journal of Physical Chemistry B*. —2015.—T. 119, № 26.—C. 8419—8424.
11. Apfelbaum E., Vorob'ev V. The Wide-Range Method to Construct the Entire Coexistence Liquid–Gas Curve and to Determine the Critical Parameters of Metals // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2015. — T. 119, № 35. —C. 11825—11832.
12. Воробьев В. С., Апфельбакм Е. М. Обобщенные законы подобия на основе некоторых следствий уравнения Ван-дер-Ваальса // *ТВТ*. — 2016. — Т. 54, № 2. —C. 186—196.
13. Apfelbaum E., Vorob'ev V. The Zeno line for Al, Cu, and U // *The Journal of Physical Chemistry B*. —2016.—T. 120, № 21.—C. 4828—4833.
14. Apfelbaum E., Vorob'ev V. The application of the Zeno line similarities to alkaline earth metals // *Journal of Molecular Liquids*.—2017.—T. 235.—C. 149—154.

15. Apfelbaum E., Vorob'ev V. Similarity laws for the lines of ideal free energy and chemical potential in supercritical fluids // *The Journal of Physical Chemistry B*. —2017.—Т. 121, № 37.—С. 8802—8808.
16. Apfelbaum E. The Zeno line and binodal for Ga // *Journal of Molecular Liquids*.—2018.—Т. 263.—С. 237—242.
17. Apfelbaum E., Vorob'ev V. Systematization of the Critical Parameters of Substances due to Their Connection with Heat of Evaporation and Boyle Temperature // *International Journal of Thermophysics*. — 2020. — Т. 41. — С. 1—14.
18. Apfelbaum E., Vorob'ev V. The Line of the Unit Compressibility Factor (Zeno-Line) for Crystal States // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2020. —Т. 124, № 24.— С. 5021—5027.
19. Apfelbaum E. The ideal lines on the phase diagrams of liquids in 2D space // *Journal of Molecular Liquids*.—2021.—Т. 334.—С. 116088.
20. Апфельбаум Е. М., Воробьёв В. С. Линии единичного фактора сжимаемости и идеальной энтальпии на фазовой диаграмме жидкостей // *Журнал Физической Химии*.— 2022.—Т. 96, № 7.—С. 959—966.
21. Apfelbaum E. The Line of Ideal Isothermal Compressibility // *The Journal of Physical Chemistry B*. —2022.—Т. 126, № 15.—С. 2912—2920.
22. Апфельбаум Е. М. Расчет бинодали висмута на основе законов подобия для линии единичного фактора сжимаемости // *ТВТ*. — 2022. — Т. 59, № 4. —С. 507—513.
23. Апфельбаум Е. М. Бинодаль серы и законы подобия для линии единичного фактора сжимаемости // *ТВТ*. — 2022. — Т. 60, № 4. —С. 629—623.
24. Apfelbaum E. Calculation of electronic transport coefficients of Ag and Au plasma // *Physical Review E*.—2011.—Т. 84, № 6.—С. 066403.
25. A wide-range model for simulation of pump-probe experiments with metals /M. E. Povarnitsyn, N. E. Andreev, E. M. Apfelbaum, T. E. Itina, K. V. Khishchenko, O. F. Kostenko, P. R. Levashov, M. E. Veysman // *Applied Surface Science*.— 2012.— Т. 258, № 23.—С. 9480—9483.

26. Apfelbaum E. The electron transport coefficients of boron and silicon plasma // Contributions to Plasma Physics. —2013.—Т. 53, № 4/5.—С. 317—325.
27. Apfelbaum E. The calculation of thermophysical properties of nickel plasma // Physics of Plasmas.— 2015.—Т. 22, № 9.
28. Apfelbaum E. The Thermophysical Properties of Iron Plasma // Contributions to Plasma Physics.— 2016.—Т. 56, № 3/4.—С. 176—186.
29. Apfelbaum E. The calculations of thermophysical properties of molybdenum plasma // Physics of Plasmas.—2017.—Т. 24, № 5.
30. Апфельбаум Е. М. Расчёт теплофизических свойств плазмы титана и цинка // ТВТ. — 2017.—Т. 55, № 1.—С. 3—14.
31. Apfelbaum E. The pressure, internal energy, and conductivity of tantalum plasma // Contributions to Plasma Physics.—2017.—Т. 57, № 10.—С. 479— 485.
32. Апфельбаум Е. М. Отклонения от закона Видемана–Франца в частично ионизованной плазме металлов // ТВТ. —2018.—Т. 56, № 4.—С. 635—638.
33. Apfelbaum E. The calculations of thermophysical properties of low-temperature carbon plasma // Physics of Plasmas. —2018.—Т. 25, № 7.
34. Apfelbaum E. M. The thermophysical properties of low-temperature Pb plasma // Contributions to Plasma Physics. —2019.—Т. 59, № 4/5.—e201800148.
35. Apfelbaum E. M. The calculations of thermophysical properties of low-temperature gallium plasma // Physics of Plasmas. —2020.—Т. 27, № 4.
36. Apfelbaum E. M. Calculations of the thermophysical properties of low-temperature Pb plasma at low densities // Contributions to Plasma Physics. — 2021.—Т. 61, № 10.—e202100063.
37. Apfelbaum E. M. Расчет теплофизических свойств низкотемпературной плазмы висмута // Физика Плазмы.—2022.—Т. 48, №10.—С. 937—943.
38. Apfelbaum E. M. The calculations of thermophysical properties of low-temperature indium plasma // Physics of Plasmas. —2023.—Т. 30, № 4.
39. Апфельбаум Е. М. Линия единичного фактора сжимаемости в низкотемпературной плазме металлов // Физика Плазмы. — 2023. — Т. 48, № 8. — С. 789—796.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»**, (д.ф.-м.н., профессор Синкевич О. А.) – отзыв положительный, содержит 2 замечания

- В автореферате не упоминается связь представленных результатов с работами известного российского учёного Маслова В. П., хотя он занимался близкими вещами.

- Вопрос о связи формы потенциала взаимодействия с формой идеальных линий на мой взгляд требует более детального описания.

2. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук»** (д.ф.-м.н., г.н.с. Игнатов А. М.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»** (д.ф.-м.н., профессор Ткаченко С. И.) – отзыв положительный, содержит одно замечание:

- Мне кажется, было бы полезно указать при моделировании каких процессов или оценках каких параметров при обработке экспериментальных данных были использованы результаты, полученные в диссертации. Кроме того, было бы полезно узнать, насколько полученные результаты соответствуют требованиям по размещению их в базах данных теплофизических свойств веществ.

4. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ им. Д. Д. Ландау РАН)**. (чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., г.н.с. Иногамов Н. А.) - отзыв положительный, содержит 4 замечания:

- В перечне "научная новизна" пункт 2, хорошо бы объяснить, что означают слова "*Впервые на основе численного моделирования для 2х и 3х мерных систем*" про 2х и 3х мерные системы.

- В пункте 4 этого перечня нарушена грамматика "*Построена химическая модель расчёта термодинамических свойств и ионного состава в области низкотемпературной плазмы и полупроводников.*"

- Хорошо бы пояснить, что означают слова про геометрическое подобие. Это нормировка значений давления плотности и температуры на критические параметры? Да, далее разъяснено.

- стр. 23. Написано "Кроме того металл не может быть представлен как однокомпонентная система во всём необходимом диапазоне плотностей, как это можно сделать для обычных газов и жидкостей". Надо бы пояснить почему. Из-за ионизации при повышенных температурах?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., г.н.м. Потехин Александр Юрьевич является ведущим ученым в области физики плазмы, статистической физики и астрофизики, а также переносных и термодинамических свойств веществ. Результаты его исследований использовались в данной диссертации при построении химической модели. Основные публикации Потехина А. Ю.:

1. Kozhberov A. A., Potekhin A. Y. Electrostatic energy of Coulomb crystals with polarized electron background //Physical Review E. – 2021. – V. 103. – №. 4. – 043205.;
2. Mazevet S. Licari, A., Chabrier, G., &Potekhin, A. Y. Ab initio based equation of state of dense water for planetary and exoplanetary modeling //Astronomy & Astrophysics. – 2019. – V. 621. – A128.;
3. Mushtukov, A. A., Markozov, I. D., Suleimanov, V. F., Nagirner, D. I., Kaminker, A. D., Potekhin, A. Y., Zwart, S. P.. Statistical features of multiple Compton scattering in a strong magnetic field //Physical Review D. – 2022. – V. 105. – №. 10. – 103027.

- д.ф.-м.н., в.н.с. Фомин Юрий Дмитриевич является признанным специалистом в области статистической физики, физики жидкостей, физики конденсированного вещества, физики плавления и расчётов фазовых диаграмм, включая и системы разной размерности. Последний пункт особенно коррелирует с результатами, представленными в диссертации. Основные публикации Фомина Ю. Д.:

1. Fomin Y. D. Boiling line and near-critical maxima of propane-nitrogen mixtures //Physical Review E. – 2022. – V. 106. – №. 6. – 064102.;
2. Tsiok E. N. Fomin, Y. D., Gaiduk, E. A. et al. The role of attraction in the phase diagrams and melting scenarios of generalized 2D Lennard-Jones systems //The Journal of Chemical Physics. – 2022. – V. 156. – №. 11. – 114703;



3. Рыжов, В. Н., Тареева, Е. Е., Фомин, Ю. Д., Циок, Е. Н. Сложные фазовые диаграммы систем с изотропными потенциалами: результаты компьютерного моделирования //Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 5. – С. 449-473.

- д.ф.-м.н., профессор Елецкий Александр Валентинович является ведущим учёным в области атомной и молекулярной физики, термодинамики и переносных свойств, а также в физике наноструктур. Его исследования в области электропроводности различных структур соответствуют вопросам, рассматриваемым в диссертации. Основные публикации Елецкого В. А.:

1. Bocharov G. S., Eletsii A. V. Percolation conduction of carbon nanocomposites //International Journal of Molecular Sciences. – 2020. – V. 21. – №. 20. – P. 7634;

2. Eletsii A. V. Phase change materials with enhanced thermal conductivity and heat propagation in them //Physchem. – 2022. – V. 2. – №. 1. – P. 18-42.;

3. Bocharov G. S., Eletsii A. V. Percolation phenomena in nanocarbon composites //Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2020. – V. 28. – №. 2. – P. 104-111.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики и медицинской химии Российской Академии Наук является профильной организацией, специализирующейся на проведении исследований в области термодинамики, строения вещества и структуры твёрдых тел, включая построение уравнений состояния и фазовых диаграмм. Кроме этого в тематику этой организации входит и физики плазмы, включая физику низкотемпературной плазмы. При этом особое внимание уделяется изучению экстремальных состояний вещества в процессе ударно-волнового сжатия. Все эти направления полностью соответствуют и тематике диссертации. Основные публикации:

1. Жерноклетов М. В. и др. Ударно-волновое сжатие азотного флюида в диапазоне давлений 140–250 ГПа. // ЖЭТФ – 2023. – Т. 163. – №. 2. – С. 274;

2. Zaporozhets Y. B. et al. The investigation of the optics of shock - compressed strongly correlated plasma //Contributions to Plasma Physics. – 2021. – V. 61. – №. 10. – e202100110.;

3. Николаев Д. Н., Ломоносов И. В. Уравнение состояния оксида железа при давлении  $\leq 1$  ГПа // Теплофизика высоких температур. – 2023. – Т. 61. – №. 2. – С. 318-320.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

– Были найдены новые идеальные линии и новые соотношения подобия, на основе анализа обширного массива экспериментальных данных, которые могут быть использованы и уже использовались соискателем для построения фазовых диаграмм широкого круга реальных веществ.

– Путём исследования численными методами модельных систем в 2х и 3х мерных пространствах найденные соотношения подобия были проверены и установлена область их применимости, а также фундаментальная связь с параметрами потенциала взаимодействия.

– На основе теории критических явления и соотношений подобия, связанных с идеальными линиями, включая и найденные в диссертации, построено общее аналитическое интерполяционное уравнение для бинодали жидкость-газ и метод оценки положения критической точки, которое было применено для металлов, для которых эти величины не могут быть получены из эксперимента или более точных методов расчёта.

– Построена модель расчёта термодинамических и переносных свойств низкотемпературной плазмы металлов и впервые проведён соответствующий расчёт для ряда металлов, в том числе галлий, висмут и индий.

– С помощью разработанной модели теплофизических свойств для низкотемпературной плазмы металлов найдены законы подобия для идеальных линий многокомпонентных систем.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

– Получены общие закономерности, в виде соотношений подобия для идеальных линий и их параметров, которые могут служить и уже служат критериями корректности произвольного метода, используемого при построении фазовой диаграммы широкого круга веществ.

– Установлена связь найденных соотношений подобия с параметрами потенциала межчастичного взаимодействия, что позволило найти область их корректного применения на микроскопическом уровне.

– Построено общее интерполяционное уравнение для бинодали жидкость-газ, применимое для широкого круга веществ.

– Впервые рассмотрен вопрос о применения законов подобия, связанных с идеальными линиями для многокомпонентных систем, и найдены соответствующие соотношения подобия, отличные от случая однокомпонентных веществ.

– Впервые рассчитаны теплофизические свойства низкотемпературной плазма ряда металлов, для которых до сих пор не было ни измерений, ни расчётов других исследователей.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

– Выведенное в работе уравнение и методика расчёта бинодали может сравнительно просто применяться и уже применялось для определения положения этой линии и оценки координат критических точек для тех веществ, где как эксперимент, так и более сложные и строгие методы расчёта не позволяют этого сделать, таким как металлы и полупроводники.

– Полученные в работе соотношения подобия могут использоваться как критерий при практическом отборе уравнений состояния для прикладных задач.

– Результаты расчёта теплофизических свойств низкотемпературной плазмы металлов уже применяются в различных макроскопических задачах, связанных с гидро- и газодинамикой, и, в частности, с взаимодействием потоков частиц или излучения с веществом. Для удобства практического применения данные расчётов, полученные в диссертации, для ряда металлов были дополнительно аппроксимированы аналитическими зависимостями в широкой области плотностей и температур.

**Оценка достоверности результатов** строилась на сравнении данных, полученных соискателем, с результатами измерений и расчётов других авторов. Было показано, что результаты расчётов по методам, представленным в диссертации, находятся в хорошем согласии с наиболее точными экспериментальными данными и результатами компьютерного моделирования других авторов в рамках других методов.

**Личный вклад соискателя** является определяющим и состоит в постановке задач, разработки новых теоретических и численных методов исследования фазовых диаграмм и построении новых моделей расчёта теплофизических свойств вещества. Значительная

часть этой работы была проделана соискателем самостоятельно, что подтверждается многочисленными публикациями и докладами на конференциях, в которых соискатель является единственным автором.

Апробация результатов исследования проводилась на 93х российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора. В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Апфельбаум Евгений Михайлович ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

На заседании от 27.03.2024 г. диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, присудить Апфельбауму Евгению Михайловичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) в количестве 26 человек, из них очно: 11 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 1 доктор наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 26, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор, академик РАН



Петров О. Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01(Д.002.110.02)

к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.

27.03.2024г.