

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

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 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)
от 25 декабря 2019 г. (протокол № 12)

Защита диссертации **Кадатского Максима Алексеевича**
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
**«Квантово-статистический расчёт термодинамических свойств простых
веществ и смесей при высоких плотностях энергии»**

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Москва – 2019

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 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 № 12 от 25 декабря 2019 г.

Диссертационный совет 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 23 человека, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 13 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02

д.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Фортов В.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
2	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
3	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
4	Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
10	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
12	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
13	Гордон Е.Б.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	01.04.08	Присутствует
16	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	01.04.14	Присутствует
17	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
18	Иванов М.Ф.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
19	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	01.04.08	Присутствует
20	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Присутствует
21	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
22	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
23	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
24	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
25	Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
26	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
27	Савватимский А.И.	Д.т.н.	01.04.14	Присутствует
28	Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
29	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
30	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Присутствует
31	Якубов И.Т.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории 16 – широкодиапазонных уравнений состояния Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Кадатского Максима Алексеевича** на тему «Квантово-статистический расчёт термодинамических свойств простых веществ и смесей при высоких плотностях энергии». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук. (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru).

Научный руководитель:

Хищенко Константин Владимирович – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией №16 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Шпатаковская Галина Васильевна - гражданка РФ, д.ф.-м.н., эксперт-советник Отдела № 15 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 125047, Россия, г. Москва, ул. Миусская площадь, д. 4).

Острик Афанасий Викторович – гражданин РФ, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Отдела экстремальных состояний вещества Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химической физики Российской академии наук, (ИПХФ РАН, 142432, Московская область, г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1).

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н. Шпатаковская Г.В. и д.т.н., профессор Острик А.В., научный руководитель Кадатского М.А. к.ф.-м.н. Хищенко К.В.

СТЕНОГРАММА

Ученый секретарь:

Уважаемые коллеги, добрый день! В наш совет обратился Кадатский Максим Алексеевич с просьбой принять к защите его работу на соискание ученой степени кандидат физ.-мат. наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы на тему «Квантово-статистический расчёт термодинамических свойств простых веществ и смесей при высоких плотностях энергии». Максим Алексеевич закончил аспирантуру МФТИ, в результате которого была выполнена эта работа. Предварительное рассмотрение этой работы было проведено экспертной комиссией нашего совета в составе Иосилевского Игоря Львовича, Ломоносова Игоря Владимировича и Воробьева Владимира Сергеевича. Они дали заключение, что тематика этой работы соответствует профилю нашего совета и может быть у нас рассмотрена. В деле имеются все необходимые документы оформленные в соответствии с требованием ВАК. И вот, только что, появился проект заключения диссертационного совета, к сожалению, появился только что. Я с вашего позволения зачитывать все документы в деле не буду, и если есть вопросы, готов на них ответить.

Председатель:

Да, пожалуйста. Спасибо большое. Есть вопросы? Если нет ... нет, как я вижу. Тогда мы переходим по существу, к защите, и, Максим Алексеевич, пожалуйста, в пределах 20 минут.

Кадатский М.А.:

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, презентация Кадатского М.А. прилагается).

Председатель:

Спасибо, Максим Алексеевич. Можно задать вопросы. Пожалуйста, да Игорь Львович.

Иосилевский И.Л.:

Николай Евгеньевич, у меня два вопроса. Я не настаиваю, чтобы сразу так.

Председатель:

Давайте начнём с чего-нибудь, а там посмотрим как пойдёт.

Иосилевский И.Л.:

Максим, Вы упомянули, что ваша работа является развитием того подхода, который плодотворно и долго разрабатывался нашими коллегами, покойными, увы, царствие им небесное, Никифоровым, Новиковым и Уваровым. Ещё раз, пожалуйста, чётко сформулируйте, как вы продвинулись, по сравнению с тем рубежом, который оставили наши коллеги. В чём вы их улучшили, усовершенствовали? Как угодно. Принципиально.

Кадатский М.А.:

Принципиально модель та-же самая, Хартри-Фока-Слэтера, но отличия именно в способе учёта зонного спектра. Но это само по себе приближение. Мы его учитывали, наш способ, что мы получили гладкие термодинамические зависимости в более широком диапазоне, чем получили Никифоров, Новиков. Т.е. наше решение в более широком диапазоне получилось.

Иосилевский И.Л.:

А вот идеология деления заряда на свободные и связанные с движением к границе, здесь вы что внесли?

Кадатский М.А.:

Мы остались на том-же уровне, касаемо ионной части.

Иосилевский И.Л.:

Не ионная часть, а вот деление электронов на свободные и связанные, на дискретный и непрерывный спектр. Вы что-то здесь продвинули?

Кадатский М.А.:

Мы, скажем, что в непрерывном спектре фактически не учитывали электронов. Только при очень высоких температурах в непрерывном спектре. А при нормальных условиях, у Никифорова был непрерывный спектр, а у нас была только зонная структура.

Председатель:

Ну может быть ко второму? Если с первым всё. Пожалуйста, Владимир Сергеевич.

Воробьёв В.С:

На сколько я понял, Вы, у Новикова, и у нас с ним есть тоже работы по азоту, там каждый уровень превращается в зону. И часто зоны перекрываются. И есть ли у вас пример, когда зона, которая при низкой плотности была ниже, становится выше с повышением плотности, как это происходит в некоторых элементах.

Кадатский М.А.:

Да, вот пример. Это расчёт для меди для разных температур. От 0.1 эВ до 100 эВ. Здесь видно, что при 10 эВ у нас идёт следующая конфигурация внешних оболочек: сначала идёт 4s, потом 4d, потом 4p. И при увеличении температуры, вот этот уровень 4p постепенно сдвигается влево, в область меньших энергий, и уже при 100 эВ у нас идёт обратный порядок.

Воробьёв В.С:

И ещё тогда вопрос, вот Вы используете вот это, с экспонентой, e в степени ikr – граничное условие. В каких оно, для сферической ячейки, во всех направлениях не может быть выполнено. Как вы с этой трудностью обходились? Там ведь только по 8-ми направлениям можно это условие выполнить.

Кадатский М.А.:

Это было приближение. Этот эффект не учитывался.

Воробьёв В.С:

Не учитывался, хорошо.

Председатель:

Так. Тогда, Игорь Львович, ещё дальше продолжаем по одному вопросу. Да, пожалуйста.

Дьячков Л.Г:

У меня в дополнение к тому, что Игорь Львович сказал. Вот, Вы сказали, что расширили область применимости своих предшественников. А можно количественно это пояснить? Чем была ограничена у них область применимости, и на сколько она расширилась у Вас.

Председатель:

И за счёт чего?

Иосилевский И.Л.:

А количественно – это что такое? В полтора раза?

Дьячков Л.Г:

Параметры. Количественные параметры. По давлению, по температуре, по чему-нибудь.

Канель Г.И.:

Как ты много пересекаешься...

Дьячков Л.Г:

Ну, тем не менее. Как-то можно сформулировать?

Кадатский М.А.:

Вот ударная адиабата алюминия. У Никифорова – коричневая, и наша линия – красная. Видно, что в области примерно от 100 ГПа до 1000 ГПа немножко по другому идёт, и вот это собственно область мы расширили. Конкретно для алюминия есть пример. Потому что расчёт был у Никифорова для алюминия. А для различного класса веществ, более комплексно, с разными ионными частями сравнение, тут ещё очень большой вклад именно ионов. Поэтому, пока мы не сравним разные модели, мы не можем точно сказать, что лучше, что хуже. А у Никифорова, Новикова, Уварова такой расчёт, более комплексный, не был проведён для разных элементов, только для алюминия.

Председатель:

Есть ещё по первому вопросу? Да, пожалуйста.

Канель Г.И.:

В продолжение этих вопросов. Могли бы вы сказать, какое новое физическое знание было получено, ведь расчётов подобных уже много сделано, и экспериментов много? И понимание есть. Что нового, вот, в понимании?

Кадатский М.А.:

Например, были получены, собственно, оболочечные эффекты на изохорической и изобарической теплоёмкости. Ранее они не были получены. Ну, собственно, научная новизна работы. Сейчас перечислю. Что, вот эти расчёты, с этим способом учёта зонной структуры, были проведены впервые, для модели в этой формулировке, в отличной. Что, были построены изоэнтропы разгрузки, также они не были исследованы до этого, такими методами. И что было показано влияние оболочечных эффектов на характер зависимости относительного изменения скорости фронта ударных волн. Т.е. этот расчёт, он нам позволил сказать, что это косвенное подтверждение наличия оболочечных эффектов, что является научным результатом.

Председатель:

Так, Игорь Львович. Сейчас, на секундочку. Да, пожалуйста, Виктор Владимирович.

Голуб В.В.:

Вот Вы говорите всё время, что при различных пористостях, понятно, вы ведь там указываете плотности. Но всё-таки, какой диапазон пористости вы использовали в ваших сравнениях?

Кадатский М.А.:

В работе представлены зависимости для образцов со степенью пористости 4. Степень пористости 4 – в четыре раза меньше нормальной начальной плотности образца.

Голуб В.В.:

А соотношение?

Иосилевский И.Л.:

Единица на одну четвёртую.

Голуб В.В.:

Что это значит? Пористость ведь не так. Непонятно.

Иосилевский И.Л.:

Так, так, так. Она от единицы и выше. Ну так определяется.

Председатель:

Ну ладно, можно брать обратную величину. Да, Игорь Львович, наверное, ваше время пришло.

Иосилевский И.Л.:

Максим, второй вопрос вот с чем связан. Вы используете для описания ионного вклада модель заряженных твёрдых шаров, я, как понимаю, одного знака. Или разного?

Кадатский М.А.:

Одного.

Иосилевский И.Л.:

Одного. У вас появляется новый параметр – размер сердцевинки. Причём напомним, вкратце, по физике, как определяется величина этой сердцевинки, радиуса. И самое главное, правильно ли я понимаю, этот радиус начинает зависеть от термодинамических параметров, при сжатии? А тогда вам нужно уравнение состояния модели заряженных твёрдых шаров с переменным радиусом, зависящим от температуры. А это штука такая – вещь в себе. Как вы обходили эту сложность?

Кадатский М.А.:

Начнём с первой части вопроса. В модели, радиус ионного остова определялся исходя из электронных расчётов. Для этого, рассчитывался также заряд свободных электронов – Z_0 . И радиус ионного остова брался таким образом, чтобы заряд на конце, границе ячейки, т.е. начиная с некоторого радиуса до конца, он был равен именно этому заряду свободных электронов, который, собственно, зависит от значения электронной плотности на границе

ячейки. На счёт второй части вопроса. Да, действительно, так как у нас вот эта функция зависит от электронных расчётов, но уравнение термодинамической согласованности мы брали только для электронной подсистемы, а не для полной системы, то у нас, из-за этого, в модель может вноситься некое термодинамическое несогласие. Но, собственно, мы говорим, что основной вклад в наших расчётах у нас был именно электронной подсистемы, а вклад ионов он был меньше. В частности, на этом рисунке представлено отношение вкладов электронных и ионных подсистем в термодинамические зависимости для разных моделей на ударной адиабате для алюминия. И видно, что самое большое у нас отношение ионного вклада в районе примерно 3 ТПа – это примерно половина от электронов.

Воробьёв В.С.:

Существенно.

Кадатский М.А.:

Существенно, да. Но, тем не менее, не больше. Не 100%. Т.е. это вносит погрешность.

Иосилевский И.Л.:

Спасибо.

Председатель:

Игорь Львович, третьего вопроса не будет?

Иосилевский И.Л.:

Нет. Но если вы настаиваете, то вы не выдержите столько.

Председатель:

Пока нет. Ещё есть вопросы, господа-товарищи члены учёного совета? Если нет, тогда давайте мы перейдём к мнению руководителя. Константин Владимирович, коротко о человеке.

Иосилевский И.Л.:

Человечище.

Шищенко К.В.:

Члены диссертационного совета, Максим работает под моим руководством ещё с тех времён, когда он был студентом бакалавриата. И над бакалаврской работой мы вместе работали. В общем-то, вот эта вот тема была сразу ему поставлена, дано направление, и то, что вы сегодня увидели – это такой большой результат большого пути, безостановочной работы, многолетней. Тот результат тоже был опубликован, бакалаврского диплома – он у нас первым пунктом шёл. Т. е. всё сюда, в копилочку, было положено. Максим работал, в основном, в большей степени самостоятельно. Выступал на конференциях, отстаивал свои результаты, обсуждал, вот, с Игорем Львовичем они много раз беседовали, при моём участии. Ни разу не подрались.

Председатель:

Это плюс или минус?

Шищенко К.В.:

Это положительно характеризует обоих. Т. е. в принципе были всякие возможности у нас уйти вправо-влево, но, тем не менее, работа так и была сделана, в соответствии с генеральной линией, которая длится уже много-много лет, на самом деле эта линия.

Председатель:

Семь?

Шищенко К.В.:

Нет, раньше, раньше. Я имею в виду, от Никифорова, Новикова, Уварова, и раньше, наверное, даже от Киржница. Томаса-Ферми, можно и от них продлить. Но, совершенно точно начиная с Киржница, который разработал, Галина Васильевна об этом ещё скажет, модель. И большой личный вклад, этой работы в науку, был связан с тем, чтобы разные модели, которые много людей разрабатывало, свести воедино, чтобы примерно одинаковыми численными методами решить и друг с другом сопоставить. Максим упомянул здесь 4 модели сочетания электронной и ионной части, но на самом деле их

было 9, ещё модель Томаса-Ферми - на некоторых графиках она промелькнула. И, соответственно, третья была ионная часть.

Председатель:

Всё, наверное, о человеке, да? Вы уже перешли к модели.

Иосилевский И.Л.:

Можно вопрос к руководителю?

Председатель:

Да, конечно. Если вы кончили.

Хищенко К.В.:

Наверное да, на этом закончу. Т. е. Максим в общем-то про свою работу кратко рассказал.

Председатель:

Вы привели только положительные примеры, поэтому понятно. Да, Игорь Львович.

Иосилевский И.Л.:

Константин, успели ли вы с Максимом обсудить ход работы пока ещё Володя Новиков был жив?

Хищенко К.В.:

Да. Мы выступили на семинаре у Владимира Григорьевича...

Иосилевский И.Л.:

В ИПМ?

Хищенко К.В.:

Да, в таком, кулуарном, так сказать. Мы ему отчитались. Да.

Иосилевский И.Л.:

Ну вот это и главное.

Хищенко К.В.:

Он в каких-то местах ...

Иосилевский И.Л.:

Таможня дала добро.

Хищенко К.В.:

Ну да, хорошо. Его тут нет, но он, в каком-то смысле, похвалил нас в том, что те наработки, которые были раньше сделаны, они здесь были выбраны исключительно самые-самые такие, которые позволяют быстро результат получить. Именно в скорости расчёта было всё здесь хорошо оптимизировано.

Председатель:

Спасибо. Если больше вопросов нет, тогда мы переходим к письменным отзывам. Михаил Михайлович. А вы присаживайтесь. Конечно.

Ученый секретарь:

Уважаемые коллеги. На автореферат поступило 5 отзывов. Все отзывы положительные, ряд из них содержат замечания. Я, с вашего позволения, остановлюсь именно на замечаниях. Первый отзыв подписан Савинцевым Алексей Петровичем из Кабардино-балкарского государственного университета. Отзыв положительный, в качестве небольших замечаний к автореферату можно отметить следующее. Первое, в тексте автореферата нет разъяснения, что за параметр ρ_{00} и, соответственно, что означает в подписи к рисунку 3 выражение $\rho_{00} = \rho_0 = 2.712 \text{ г/см}^3$. Второе, на рисунке 3 автором многие источники результатов измерений обозначены чисто символически (например, Волков 1980, Подурец 1994 и т.д.) и не расшифрованы в примечаниях, как, например, Ragan 1982 года, Ragan 1984 года. В издании отсутствуют пробелы между подписью к рисунку и текстом автореферата, что усложняет знакомство с материалом. Несмотря на эти замечания, автор заслуживает присуждения степени. Следующий отзыв поступил из НИЯУ МИФИ. Составлен и подписан доцентом кафедры прикладной математики Вронским Михаилом Александровичем. Отзыв положительный, имеется ряд замечаний. Первое, формулы модели ХФС, это Хартри-Фока-Слэтера, один раз расшифрую, раздела 1 первой главы фактически полностью (за исключением формулы (1.26) для плотности

числа состояний промежуточной группы) взяты из работы [1]. Ссылка стоит, можете её в автореферате посмотреть. Наиболее важную часть реализации модели представляют особенности алгоритмов. Описание таких особенностей полностью отсутствует в диссертации. Без такого описания (хотя бы некоторых особенностей) трудно сделать вывод о том, что сделано автором самостоятельно. Второе, промежуточные состояния с указанными граничными условиями не ортогональны состояниям дискретного спектра (с выбранным граничным условием $R_{nl}(r_0) = 0$). Ортогональность состояний существенно используется при сведении многоэлектронной задачи к одноэлектронной. Исследование того, велика ли степень этой неортогональности, и как она может повлиять на расчётные термодинамические функции, в диссертации отсутствует. Третье, формулы для нахождения давления и внутренней энергии электронной компоненты взяты, опять цитата, из работы [1] из перечня автореферата. Вместе с тем, известно, что расчёт по этим формулам имеет ряд серьёзных трудностей, которые в том числе приводят к отказу (во всяком случае для давления) от формул типа 1.30а, и применению теоремы вириала и иных подходов (см., например, [2],[3], ссылки на которые есть в диссертации, а также [4]). Никаких упоминаний о такого рода сложностях и путях их преодоления в диссертации нет. При рассмотрении вклада в термодинамические функции ионов считается, что они имеют заряд Z_0 , равный средней степени ионизации плазмы. Это означает, что ионы рассматриваются вместе со связанными электронами. С другой стороны, вклад связанных электронов уже учтён. Таким образом, возможен двойной учёт некоторых составляющих. Пятое, в диссертации много говорится об эталоне. При этом, подтверждений более высокого качества получаемых уравнений состояния (по сравнению с моделями ТФ Томаса-Ферми или ТФП), по-моему, недостаточно. Наличие осцилляций термодинамических величин, которые трактуются, как оболочечные эффекты, таким подтверждением не является. Например, из рисунка 1.2 (а также других) видим значительное отклонение результатов расчётов по реализованной модели ХФС там, где Томас-Ферми и Томас-Ферми с поправкой - близки (при температурах выше 100 эВ), а значит, квантовые поправки - малы и ХФС также должна давать результаты, близкие к Томасу-Ферми. Шестое. По моему мнению, в диссертации недостаточно отражены результаты, полученные Новиковым и Грушиным в ИПМ им. Келдыша, очень близкие к тематике диссертации. Подводя итог, можно сказать, что из диссертации, и особенно автореферата, трудно оценить вклад диссертанта в выбранное направление. Формальные требования к автореферату, диссертации и апробации работы выполнены – это позволяет в целом оценить сам результат.

Председатель:

А кто это был?

Ученый секретарь:

Это отзыв Вронского Михаила Александровича, доцента кафедры прикладной математики НИЯУ МИФИ, кандидата физ.-мат. наук. Следующий отзыв поступил из Центра фундаментальных и прикладных исследований ВНИИА «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики Духова». Отзыв положительный. Имеется одно замечание. Квантово-статистические модели, используемые диссертантом для расчетов и реализованные в авторском программном коде, очень сложны с точки зрения используемых численных алгоритмов, однако эти детали совершенно не раскрыты автором. В частности, не раскрываются детали программной реализации (языки программирования, используемые библиотеки, архитектура программы), а также характерное время расчета одной точки в таблице широкодиапазонного уравнения состояния. Но делается вывод, что указанное замечание не носит принципиальный характер и не снижает общей высокой положительной оценки. Также есть отзыв из Всероссийского научно-исследовательского института технической физики имени Забабахина. Отзыв составлен и подписан начальником лаборатории Смирновым Евгением Борисовичем, кандидатом технических наук. Отзыв положительный, без замечаний. И,

наконец, пятый отзыв составлен Красюком, доктором физ.-мат. наук из ИОФ РАН. Отзыв положительный, и также без замечаний. Помимо отзывов на автореферат, у нас есть заключение ведущей организации. В качестве ведущей организации был Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». С вашего позволения, целиком отзыв я зачитывать не буду, только остановлюсь на структуре и замечаниях, которые сформулированы. В тексте отзыва отмечена актуальность работы, объём и структура диссертации, а также научная новизна, и практическая и научная значимость работы. В тоже время есть ряд замечаний, которые я зачитаю. Первое, в заключении работы на основе сравнения результатов расчётов с экспериментальными данными по ударно-волновым свойствам алюминия, железа, меди и молибдена приводится вывод о хорошем описании моделью Хартри-Фока-Слэтера с учётом ионов по модели заряженных твёрдых сфер поведения вещества в состояниях с высокой плотностью энергии, но при этом в работе не приводится сравнение результатов расчётов с доступными экспериментальными данными по статическим измерениям сжимаемости веществ на алмазных наковальнях. Второе, в пункте 2 практической и научной значимости во введении работы отмечается, что рассчитанные значения изохорической электронной теплоёмкости алюминия и молибдена позволяют оценить значения электронной температуры, получаемой в экспериментах по изучению взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с веществом. Однако расчетных значений электронной температуры алюминия или молибдена не приводится. Третье, в пункте 4 практической и научной значимости введения отмечается, что, рассчитанные зависимости относительного изменения скорости фронта ударных волн при прохождении границы раздела двух веществ позволяют найти область параметров, в которой возможно экспериментальное подтверждение наличия наблюдаемых в расчетах осцилляций. Указана относительная точность измерения волновых скоростей для экспериментального подтверждения этого эффекта пять десятых процента. Но таких экспериментальных данных с указанной точностью не приводится. Но в тоже время, делается заключение, что отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой диссертации и, делается вывод, что диссертант заслуживает присуждения ему искомой степени. Спасибо.

Председатель:

Максим Алексеевич, пожалуйста, ответ ваш на замечания. Если можно, сгруппируйте, если у вас получится.

Кадатский М.А.:

Замечания ведущей организации. Насчёт первого замечания, что не было проведено сравнения с данными по сжатию в алмазных наковальнях. Насчёт этого замечания. Целью, изначально, этой работы поставленной, было получить новую теоретическую информацию в области вещества где, оно находится в состоянии горячей плотной плазмы. Т. е. это разогретое вещество. Тогда как в экспериментах по статическим измерениям температура, как правило, не превосходит 1 эВ. И в этой области параметров, квантово-статистический подход моделей среднего атома не ожидалось что он будет применим. В частности, здесь приведены, из этой работы, кривые холодного сжатия алюминия по трём моделям: Томас-Ферми, Хартри-Фок-Слэтера и Томас-Ферми с поправками, и здесь мы наблюдаем, что ни одна из этих моделей не описывает данные вот эти статические. Т.е. мы в этой области согласия не ожидали и его, собственно, не получаем. Поэтому, с каким-то большим массивом экспериментальных данных мы не стали приводить сравнения. Насчёт второго замечания, про то, что была дана оценка, необходимой погрешности для экспериментов, где можно было бы наблюдать оболочечные эффекты, но этих экспериментов не были приведены. Эти эксперименты, не были приведены, с точностью пол процента, так как в области где влияние оболочечных эффектов максимально, где необходимо провести эти измерения, данных экспериментов с указанной точностью не имеется для исследуемых веществ. На счёт третьего замечания. Напомните, ведущая организации.

Председатель:

Я не знаю, насчёт ведущей или нет, но там про...

Кадатский М.А.:

Я сейчас закончу с ведущей.

Председатель:

Но в любом случае был вопрос относительно математики, которую вы использовали.

Кадатский М.А.:

Это другой отзыв.

Председатель:

Да, я говорю, но он был. Относительно ресурсов. И, соответственно, относительно тех трудностей математических, которые вы обошли. Ну да, просто опустили.

Кадатский М.А.:

Вот это собственно замечание на автореферат из саровского филиала НИЯУ МИФИ. Было указано, что на рисунке 1.2, это собственно рисунок 1.2 из диссертации, что в области от 100 эВ, где модель Томаса-Ферми и Томаса-Ферми с поправками уже совпадают, результаты по модели Хартри-Фока-Слэтера довольно сильно от них отстают. И, собственно, в этом есть суть оболочечных эффектов, что они не смотря на то, что их средняя амплитуда может быть немного больше, чем разница вклада квантовых эффектов, если мы сгладим эти осцилляции, то у нас также примерно будет примерно получено по этим моделям. Т.е. я не согласен с замечанием, что именно вот эта амплитуда должна быть меньше чем разница между моделью Томаса-Ферми и Томаса-Ферми с поправками. Это не обязательно. Следующее замечание, то что формулы модели Хартри-Фока-Слэтера были полностью взяты из работы Никифорова, Новикова, Уварова, за исключением уравнения 1.26. Вот это, собственно, уравнение 1.26 на расчёт плотности электронных состояний. Оно было получено мной самостоятельно, исходя из выкладок, которые были также в этой работе приведено к этой форме. Наиболее важную часть реализации модели представляют особенности алгоритмов. Все численные алгоритмы, если это не было уточнено иначе, были взяты также из этой работы Никифорова, Новикова, Уварова. В частности, расчёт уравнения Шрёдингера был реализован с помощью фазового метода. И, собственно, там, где у нас было указано иначе, мы использовали определённые методы, скажем, для смесей. А где это не указано, методы были использованы те же самые. То, что промежуточные состояния с указанными граничными условиями не ортогональны состояниям дискретного спектра. Вот это граничные квазипериодические граничные условия на состояния промежуточной группы, и, собственно, вопрос об их ортогональности волновым функциям состояний других групп, в частности, дискретного спектра, он в этой работе не исследовался, и влияние этой погрешности мы действительно не учитывали. Это выходило за рамки этой работы. Так. Следующее замечание. Насчёт численных трудностей для расчёта давления по вот этой формуле, взятой из работы Никифорова, Новикова, Уварова. В отзыве на автореферат утверждается, что расчёт по этой формуле связан с различными численными трудностями. Все расчёты давления по модели Хартри-Фока-Слэтера в моей работе выполнялись именно по этой формуле. И в указанном диапазоне параметров, где нам была необходима эта формула, у нас не возникли какие-то особенные численные трудности. Тогда как численные трудности, о которых упоминаются в ссылках отзыва, они относятся к модели Либермана, где по этим формулам затруднён учёт именно резонансных состояний, которые возникают только в той модели. А в модели Хартри-Фока-Слэтера эти состояния не возникают. Следующее замечание, что при рассмотрении вклада в термодинамические функции ионов считается, что они имеют заряд Z_0 , равный средней степени ионизации. Таким образом, возможен двойной учёт некоторых составляющих, связанных состояний. В частности, по модели заряженных твёрдых сфер. Ну это действительно так, и это, собственно, вносит погрешность в эту модель – недостаточная физическая достоверность по модели заряженных твёрдых сфер. Именно для этого, в этой работе было проведено сравнение с

различными ионными моделями, в частности, с моделью идеального газа, где такого эффекта нет – там нет взаимодействия. И мы посмотрели, собственно, диапазон параметров, где и какую может внести погрешность ионная часть. Следующее, в диссертации много говорится об эталоне. При этом, подтверждений более высокого качества получаемых уравнений состояния, по-моему, недостаточно. Наличие осцилляций термодинамических величин, которые трактуются, как оболочечные эффекты, таким подтверждением не является. Насчёт этого замечания, я могу сказать следующее, что, собственно, область, то что мы говорим, что модель Хартри-Фока-Слэтера и полученные по ней эталоны более совершенны по сравнению с моделью Томаса-Ферми, основано не только на наличии оболочечных эффектов, а за счёт того, что модели мы сравнивали с экспериментами и у нас область согласия с экспериментами больше. У нас был акцент, именно, на определение области применимости модели исходя из экспериментальных данных, а не из качественных эффектов. Следующий отзыв из ФГУП ВНИИА им. Духова. Квантово-статистические модели, используемые диссертантом для расчетов и реализованные в авторском программном коде, очень сложны с точки зрения используемых численных алгоритмов, однако эти детали совершенно не раскрыты автором. В частности, не раскрываются детали программной реализации (языки программирования, используемые библиотеки, архитектура программы), а также характерное время расчета одной точки в таблице широкодиапазонного уравнения состояния. Да, действительно, эти данные в диссертации не были раскрыты, так как акцент был именно на результатах расчётах и использованных моделях, а не на численных и программных алгоритмах. Но я расскажу сейчас эти детали. Язык программирования использовался Fortran. Архитектура программы была многопроцессорная. Использовалась библиотека для этого OMP. Характерное время одной точки уравнения состояния равняется для простого вещества одна минута.

Председатель:

На чём?

Кадатский М.А.:

На 8-ми процессорах обычного персонального компьютера. Для сравнения, когда мы сравнивались с моделью DFT комбинированной с квантовым методом Монте-Карло, вот эта чёрная сплошная кривая, для расчёта одной точки уравнения состояния вот этой кривой использовалось несколько месяцев работы суперкомпьютера. Так. Всё. На отзывы ответил.

Председатель:

Спасибо, но тогда мы переходим к оппонентам. Галина Васильевна, первое слово вам. Пожалуйста.

Шпатаковская Г.В.:

Перейду сначала к содержанию. Надо сказать, что работа теоретическая. Не делается акцент на том, что автор изобрёл модель. Модели известные. Но внёс свою лепту в некоторое усовершенствование модели Хартри-Фока-Слэтера, которое всё-таки имеет место, и это надо отметить, как плюс. А в основном акцент – это использование этих трёх моделей, моделей среднего атома для вычисления термодинамических характеристик горячей плотной плазмы. Необходимость в этом есть, конечно, потому что надо интерпретировать эксперименты, которые уже были давно сделаны, относительные измерения тоже требуют теоретических базовых моделей и представлений. Современные эксперименты взаимодействия мощных кратких импульсов с веществом также требуют интерпретации. Для интерпретации надо знать термодинамику вещества в указанном диапазоне плазмы фазовой диаграммы. Также математическое моделирование энергетических проектов современных также требуют информации об уравнении состояния, являющейся основной физической характеристикой для этих расчётов. Автор, на мой взгляд, справился с поставленными задачами. И, наверное, стоит остановиться на замечаниях. Замечания и вопросы, которые у меня возникли. Значит, первое. Как автор

может объяснить результаты по парам веществ, для которых не удалось получить согласие с экспериментальными данными в обе стороны? Т.е. когда бралось два вещества в контакте, и когда одно за эталон принимается, или другое, и вот нету взаимной однозначности у некоторых пар. У каких-то есть, у каких-то нет. Как это можно объяснить? Сразу отвечает?

Председатель:

Нет, лучше потом.

Шпатаковская Г.В.:

Следующий вопрос у меня просто такое замечание поверхностное. Градиентные эффекты связаны не с конечным значением электронной плотности в нуле, как утверждает автор на странице 15, а с учетом неоднородности в системе. Бесконечная плотность в нуле является уже следствием пренебрежения ими в модели Томаса-Ферми, которая получается в результате локального применения формул идеального электронного газа к заведомо неоднородной системе атомной ячейки. Третье замечание. Автор ссылается при формулировке периодических условий на границе сферической ячейки на работу 75 года, тогда как впервые эти условия были сформулированы в работе Гандельмана 62 года. Четвёртое замечание у меня связано с расчётом энергетических зон в атоме, в атомной ячейке, энергии связи. Там получается, что при сжатии и при температуре высокой зона $4p$ оказывается выше чем зона $4d$, что совершенно непонятно с точки зрения основного состояния. В основном состоянии наоборот все эти зоны расположены: s , p , d , f и так далее. На самом деле это замечание, признаюсь, я включила именно для того, чтобы обратить внимание на существующий беспорядок в области вычислений энергии связи даже для основного состояния атомов и это то, чем я сейчас занимаюсь, там есть большой разброс экспериментальных данных. Теория тут тоже ещё недостаточно дотягивает и есть разночтения с экспериментом. Что же говорить о сжатом атоме, или нагретом атоме, тут вообще об эксперименте речи нет. И поэтому, вычисления, которые Максим Алексеевич проделал, они очень важны. Это, какие-то всё таки представления о том, что происходит при этих условиях. И я надеюсь, что мы с Максимом, будем как-то контактировать на эту тему, чтобы выявить какие-то закономерности зависимости этих уровней и зон энергии от плотности и температуры. Ну это в сторону, отвлечение. Пятое замечание такое. Почему приведенная на стр. 36 формула для электронного давления в модели ХФС не совпадает с той формулой, что приведена в работе на стр.297 и на которую автор сам ссылается? Или это опечатка? Мне как-то было непонятно. И последнее замечание, чисто редакторского характера. В работе встречаются стилистически неудачные обороты: «наблюдаемая регулярность ... наблюдается», «классифицируются на ...», «Под ϵ и $Rn_l(r)$ обозначены...», «путем аддитивного сложения...». Перечисленные недостатки ни в коей мере не снижают общей положительной оценки работы. Диссертант решил все поставленные задачи. Рассчитанная электронная теплоёмкость может быть использована для оценки электронной температуры в экспериментах по взаимодействию фемтосекундных лазеров с веществом. Практически значимы полученные автором аппроксимации ударных адиабат рассмотренных четырех металлов, рекомендованных в качестве ударно-волновых эталонов. Новые теоретические результаты получены для интерпретации относительных измерений. Таким образом, работа является законченным исследованием, дающим практический инструментарий для многих приложений. Достоверность полученных результатов подтверждается теоретическим обоснованием использованных моделей, сопоставлением с результатами экспериментов. Материалы опубликованы. Автореферат в полноте отражает содержание диссертации. Ну и главные слова. Диссертация Кадатского Максима Алексеевича является завершённой научно-исследовательской работой, соответствующей требованиям, предъявляемым пунктом 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, представляемым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08

Физика плазмы. Ее автор, Кадатский Максим Алексеевич, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Председатель:

Спасибо большое, Галина Васильевна. А можно у вас, для образования собственного спросить. Вот, собственно, вставляли вопросы относительно того, что эти осцилляции на некоторых характеристиках являются проявлением, как раз, внутренней зонной структуры. Вы считаете, что это действительно?

Шпатаковская Г.В.:

Мне очень понравились картинки теплоёмкости

Председатель:

Картинки мне понравились, но там дальше встаёт вопрос, это является действительно, доказательством того, что этот метод более точный, или наоборот?

Шпатаковская Г.В.:

Мне кажется, что, конечно, при сравнении с экспериментом тут трудно, косвенно.

Председатель:

Ну с экспериментом там явно никогда, в ближайшем будущем не будет померено, там пол процента нужно вроде точность.

Шпатаковская Г.В.:

Да, да. Но здесь вы точность не увеличите, трудно. А вот то что теплоёмкость рассчитана, это подтверждает характер. И то, что она так плавно рассчитана, это говорит о математической точности метода.

Председатель:

Спасибо большое. Да, пожалуйста.

Кадатский М.А.:

Первое замечание. Как автор может объяснить результаты по парам веществ, для которых не удалось получить согласие с экспериментальными данными в обе стороны? На данном графике представлены зависимость волновой скорости в алюминиевом экране в зависимости от волновой скорости в образцах меди. При этом, образцы меди брались с разными степенями пористости. В частности, красная кривая – это степень пористости 1, сплошной образец. Синяя – 3.1. И зелёная – 4. И здесь видно, что расчёты по модели Хартри-Фока-Слэтера с обоими ионными частями результаты расчётов не описывают вот эти экспериментальные данные. Объяснения этого несогласия. Можно сказать, что в области достаточно относительно низких плотностей у нас область применимости нашей модели может не входить вот эта область, область применимости наших моделей. Т.е. возможно, что в этой области именно у нас модели не работают для этих веществ. Второе. Градиентные эффекты связаны не с конечным значением электронной плотности в нуле, как утверждает автор на стр.15, а с учетом неоднородности в системе. Бесконечная плотность в нуле является уже следствием пренебрежения ими в модели Томаса-Ферми, которая получается в результате локального применения формул идеального электронного газа к заведомо неоднородной системе атомной ячейки. Вот это текст, который у нас был в диссертации. Здесь видно, что в модели Томаса-Ферми отсутствует учёт обменных, квантовых, градиентных, корреляционных и оболочечных эффектов. То, что именно в модели Томаса-Ферми градиентные эффекты связаны с конечным значением электронной плотности в окрестности нуля. Поэтому, принимаю замечание. Что более корректно будет сказать, что это связано с неоднородностью, а не с конечным значением.

Шпатаковская Г.В.:

Согласны?

Кадатский М.А.:

Я согласен. Это более точная формулировка. Вот эта формулировка подразумевает ещё какую то интерпретацию, а это более прямая формулировка. Так, следующее, третье. Формулировка периодических условий на границе сферической ячейки была дана не в работе 75 года, в диссертации была такая ссылка вот с этими уравнениями. А в статье

Гандельмана с соавторами 62 года. Вот эта. И, собственно, в статье 62 года эти граничные условия были написаны вот в таком формате. Это справедливое замечание, что надо было ссылаться на более раннюю работу. За 13 лет до этого была ссылка. Четвёртое. Обратное положение полос 4p и 4d на рис. 1.3 на стр. 34 все же кажется не объяснимым. Правильна ли их идентификация? Ответ. Идентификация у нас правильная. Собственно, я уже показывал эту картинку при ответе на вопросы. Это зависимость плотности электронных состояний по модели Хартри-Фока-Слэтера для меди при нормальной плотности для разных температур. Вот тут, начиная расчёт от 0.1 эВ и видно, что у нас заполнена только внешняя оболочка 4s и 3d у меди. При этом у нас на 4s два электрона, а на 3d девять. Тогда как в реальности, у нас на самом деле 3d десять, а на s один. Но эта модель даёт именно такое распределение. При этом обратное положение полос в основном состоянии оно не считается, потому что в основном состоянии эти уровни не заполнены (4p и 4d). Но уже при больших температурах, в частности, при 10 эВ. У нас 4p становится больше по энергиям чем область 4d. С увеличением в дальнейшем температуры эти зоны перекрываются да тех пока, пока 4p не станет по энергии меньше, чем уровень 4d. Этот эффект связан с тем, что в зависимости от орбитального квантового числа l у нас берутся свои граничные условия. В частности, для нечётных l при значении квазиимпульса 0 у нас для волновых функций выполняется вот это граничное условие, а для чётных l граничное условие на производную волновой функции. Вот, собственно, вот эта разность она приводит к тому, что у нас по разному трактуются эти зоны, и они могут друг от друга не зависеть. Ну, собственно, эти же результаты были получены, в частности, в работе Никифорова, Новикова, Уварова. Здесь представлена зависимость разрешённых энергий в зависимости от квазиимпульса для алюминия при нормальной плотности и при двух значениях температуры. Соответственно, при 10 эВ у нас нижний уровень это 3s, потом самый верхний уровень 3p, уже между ними идёт уровень 3d. Тогда как при 100 эВ, также нижний 3s, 3p находится уже под 3d, и, соответственно, порядок тоже поменялся. Следующее. Почему приведенная на стр. 36 формула 1.30a для электронного давления в модели ХФС не совпадает с той формулой (4), что приведена в работе [28] и на которую автор сам ссылается? Или это опечатка? Вот в этой книжке, эта формула она с опечаткой. А в диссертации приведена правильная формула. Т.е. в частности у нас тут g -квадрат, и восьмёрка соответственно тут четвёрка. В работе встречаются стилистически неудачные обороты: «наблюдаемая регулярность ... наблюдается», «классифицируются на ...», «Под ϵ и $R_n l$ обозначены...», «путем аддитивного сложения...».

Председатель:

Ну это, по-видимому, факт.

Кадатский М.А.:

Я согласен, что это неудачные обороты. И соглашаюсь с замечанием.

Председатель:

Хорошо, спасибо. Мы переходим ко второму оппоненту, пожалуйста, Афанасий Викторович Острик.

Острик А.В.:

Работа посвящена актуальной фундаментальной теме - это разработки физико-математических моделей вещества для расчета термодинамических свойств. При этом, электронная подсистема описывается на основе классических моделей Томаса-Ферми, Томаса-Ферми с поправками и Хартри-Фока-Слэтера. И казалось бы, что тут уже ничего нового нельзя сделать, потому что эти модели были уже очень давно предложены, разработаны. Работ по этим моделям очень много. Тем не менее, автору удалось в двух направлениях продвинуться. Первое направление, что в модели Хартри-Фока-Слэтера был свободный параметр. Ну, естественно, когда мы хотим что-то сделать из первопринципов, то уязвляет гордость человеческую, что есть параметр, что от куда-то извне привносится. Вот, автор с этой проблемой справился. И вторая проблема, что эти все модели они в адиабатическом приближении, понятно, это не от хорошей жизни. Поэтому, мы

фактически модели ионной подсистемы привносим извне. Так вот как её? И возникает вопрос, как её сочетать с моделью электронной подсистемы, когда они практически не завязаны. Вот тут задавался вопрос, что из электронной подсистемы мы берём характеристики ячейки: размер, заряд. Вот это я в работе не прочувствовал, хотя декларируется, что что-то берётся из этого. Но, тем не менее, задача другая решена. Он взял и разные модели две. Ну вы знаете, что это бесовство больших чисел, это число сочетаний очень большое. При этом нужно иметь в наличии все эти модели, чтобы их сочетать. Вот ему удалось. В общем-то, результат достаточно очевидный, получился. Что самые хорошие модели в сочетании дают самый хороший ответ. Т. е. Хартри-Фока-Слэтера и заряженные твёрдые сферы в сочетании, в общем, понятно, взяли лучшее и получили. Но, тем не менее, это подтверждено огромным количеством экспериментальных данных. Сравнений, обычно, легко написать замечание, что мало сравнений с экспериментом. А вот здесь этих сравнений просто предостаточно. Это черта Фортовской школы, что точек на графиках столько, что сами графики иногда не видно. Я хотел бы, всё-таки, отметить, что у Максима Алексеевича есть свойство, что он так тихо говорит, что половина зала его не слышит. Это какая-то излишняя скромность. И поэтому, не очень понятно, мне, по крайней мере, не было слышно, основные достоинства работы. Я очень немного скажу. Ну, вот эти все, три модели – они модернизированы. От автора очень трудно добиться, что в какой модели что было сделано, особенно в математическом плане. И здесь добивались, но не добились. Он многое скрывает, как хороший разведчик. Ну, на самом деле, усовершенствована модель Хартри-Фока-Слэтера – убран свободный параметр. Посчитаны изохорическая и изобарическая электронные теплоёмкости. Для построения УРСа это очень важно. Ударно-волновые характеристики представительного набора веществ посчитаны. Ударно-волновые эталоны. Раньше, те, кто занимается УРСом, они просто очень нуждаются в ударно-волновых эталонах, чтобы его построить. Причём, все эталоны асимптотически выходят на модель Хартри-Фока-Слэтера и заряженных твёрдых сфер, ну, на сочетание этих двух моделей, что очень важно. Автор локализовал, опять же, это прозвучало в отзыве первого оппонента, локализовал ту область, где надо проводить вот те эксперименты, о которых мы мечтаем, чтобы обнаружить осцилляции. Когда эта рекомендация практически понадобится, здесь народ сомневается, но рекомендация есть, есть к чему стремиться. Ну, я всё пропущу, всё хорошо, хорошо. Теперь, в качестве замечания. Вот как-то странно, не прозвучало в замечаниях. Дело в том, что автор декларирует, что он может считать практически до релятивистского предела, т. е. mc^2 это 10^5 эВ – это миллиард градусов. Вещество, в этом состоянии, ну хотя бы даже 100 миллионов себя не мыслит без равновесного излучения. Автор упоминает, что такое бывает излучение. Но последовательно игнорирует вклад в энергию и давление вот этого излучения. Поэтому, ему, вот эти вот ударные вещи, которые выходят, здесь они подвержены сомнению. Да, я ещё хочу сказать, что формулировать замечания к моделям, я только одно замечание сформулировал. Считаю что, очень легко делать замечания. Вопрос поднят очень сложный, модели они физические, но они не общие. Поскольку, ну слаб человек. Не можем мы ещё хорошо модели сформулировать и хорошо свойства вещества считать. И не скоро, наверное, научимся это делать. Поэтому, труднее предложить что-нибудь новое. Практически невозможно – ресурс исчерпан сделать лучше. И спасибо автору.

Воробьёв В.С.:

Модель VASP. Она лучше.

Острик А.В.:

Ну да, тут согласен. На выходе, в результате, мы имеем квалифицированного специалиста. Люди уходят, и тут это уже тоже отмечалось. То, что в распоряжении ОИВТана появляется вот такой специалист, который владеет целым набором квантово-статистических моделей - это очень здорово. Он у нас уже докладывал. Докладывал точно также – тихо, скромно. Трудно было узнать в чём новизна, практическая значимость. Но,

тем не менее, она в работе есть, и мы поддержали работу. И предлагаю этот совет тоже её поддержать.

Председатель:

Спасибо. Так что заключение ваше, что удовлетворяет тем требованиям, которые должны быть?

Острик А.В.:

Ну да.

Председатель:

Не, не. Всё. Вы подтверждаете. Мы услышали. Да. Спасибо, спасибо. Да, отвечайте, Максим.

Кадатский М.А.:

Замечание что, хотя соискатель и упоминает о необходимости учета равновесного излучения при построении УРС при высоких температурах, но последовательно игнорировал его вклад во внутреннюю энергию и давление.

Храпак А.Г.:

Вот теперь говорите погромче, пожалуйста.

Кадатский М.А.:

Хорошо, постараюсь. На данном графике представлена зависимость давления в логарифмическом масштабе от степени сжатия. График взят из работы Фортова – Уравнения состояния вещества: от идеального газа до кварк-глюонной плазмы. И здесь, это зависимость ударно волнового сжатия алюминия при гигабарных давлениях. Ну и видно, что в области, где у нас существенен вклад равновесного излучения – обозначен словом радиация, он находится выше чем максимальные давления получаемые в экспериментах. Ну, собственно, когда мы интерпретировали вот эти эксперименты, поэтому и это и была мотивация, почему мы могли пренебречь, что это более высокая область по температурам и давлениям. Всё.

Председатель:

Спасибо. Ну тогда у нас дискуссия может образоваться. Ну, слово сначала если хотите, после дискуссии. Присаживайтесь, попозже, а мы пока подискутируем. Кто хочет сказать что-нибудь? Да, Паша, пожалуйста.

Левашов П.Р.:

Дорогие коллеги. Максим Алексеевич обучался у нас на кафедре, на кафедре физики высокотемпературных процессов. Я очень рад, что он смог дойти до защиты диссертации и представил свою диссертацию в срок. Его основное достижение, на мой взгляд, о котором упомянул Афанасий Викторович, состоит в том, что теперь в ОИВТ есть программа, по которой можно рассчитывать те свойства, о которой он говорил. Я скажу, что это не единственное, что такие программы могут. Здесь докладывалось о термодинамических свойствах. По этим программам считают транспортные и оптические свойства в том числе, что, в общем, делает эту программу вообще универсальной для получения широкого спектра свойств плотной плазмы. И, надо сказать, что такие программы в мире есть, но ими не делятся и их не продают. Соответственно, то что теперь эта программа есть, и есть специалист.

Председатель:

Поэтому он и не рассказывал о ней.

Иосилевский И.Л.:

И говорил тихо.

Левашов П.Р.:

То что такая программа есть и есть такой специалист это большое достижение. Надо сказать, что он не первый кто попытался это сделать, но первый, кто дошёл до практических результатов. Поэтому, я призываю вас поддержать эту работу. Проголосовать положительно. И, я надеюсь, что он получит учёную степень.

Председатель:

Спасибо, Павел Ремирович. Ещё пожалуйста. Да, Владимир Сергеевич.

Воробьёв В.С.:

Всё что я хотел сказать, уже ... у меня перехватили инициативу. Я хотел обратить внимание на ситуацию связанную с зонной структурой. В этой работе практически мы наблюдаем изолированный атом, у него уровни. Начинаем сжимать. Уровни начинают выталкиваться. Причём, они не одновременно. Основной уровень быстрее, возбуждённый медленней. Кроме того они начинают расползаться. В какой-то момент получается, что край нижней зоны d становится самым низким состоянием. Произошла перестройка электронного спектра. Такая вещь в цезии приводит к тому, что кривая плавления от нормальной становится аномальной. Вот это зафиксировано в обзоре у, из физики высоких давлений, Стишова. Поэтому, этот эффект здесь пойман и хорошо описан. А дальше я повторю своё впечатление. Здесь сама постановка и реализация этой программы это для квалификационной работы большая сложность. Потому что программа очень сложная и повторить, и то что теперь ей уже можно пользоваться, не только ей, а целым спектром этих программ, это большая заслуга. А недостаток, метода среднего атома, он хорошо, вот, докладчик сам сказал, что электроны мы описываем с величайшими деталями, как зоны расширяются. И ионы? Идеальный газ или твёрдые сферы с кулоном. Это очень грубо. Две несовместимые по своей точности методы. И где это должно сказаться? Вот, как-то, это не было сказано. Когда мы идём в область малых плотностей, где ионы уже двигаются вполне себе. А когда они зажаты при больших давлениях и чуть-чуть двигаются, этот метод очень хорошо работает. Кроме того, не было сказано трудность, которая здесь обойдена, среди примеров расчётов только вещества, которые не образуют молекул. Или есть у вас? Молекул нет? N_2 нету здесь? Азот, адиабат? Потому что он на какой-то ветки адиабаты он становится молекулярным. Для этого метода это всё! Это метод совершенно не работает. Поэтому я считаю, что сейчас происходит какая-то переоценка. Вот, если бы раньше сказали, что в метод очень мало чего нового привнесено. Но сам метод настолько сложный, что повторить само создание этого блока программ является тоже, вполне себе, квалификационной работой. Поэтому, я думаю, что надо поддержать эту работу. Тем более, она имеет дальнейшие перспективы.

Председатель:

Спасибо, Владимир Сергеевич. Ещё есть желание у кого-нибудь что-нибудь сказать, сообщить? Хорошо, будем считать что всё понятно. Тогда, вот теперь ваше заключительное слово.

Кадатский М.А.:

Я ещё забыл упомянуть про замечание на автореферат из КБГУ. Было замечание, что не расшифровано ρ_{00} что такое на рисунке

Председатель:

Да, да, да. На рисунке. Это действительно. Я посмотрел.

Кадатский М.А.:

Это обозначение начальной плотности образца. И когда написано, что $\rho_{00} = \rho_0$, имеется в виду, что начальная плотность образца равна нормальной плотности вещества.

Председатель:

Нормальной, да. Понятно, хорошо. Это всё ваше заключительное слово или что-то ещё хотите сказать?

Кадатский М.А.:

Ну да, всё.

Председатель:

Отлично. Тогда у нас опять встала проблема счётной комиссией. Но она, по-моему, блестяще справилась со своей задачей и поэтому есть предложение повторить.

Нет возражений? Если нет, то мы должны проголосовать. Кто за? Прошу голосовать. Возражения? Нет? (*Счётная комиссия, в составе Воробьёва В.С., Дьячкова Л.Г., Иосилевского И.Л., выбирается единогласно*). Тогда прошу счётную комиссию

приступить, а всех членов диссертационного совета проголосовать. (*Проводится процедура тайного голосования*).

Председатель

Уважаемые члены Совета! Давайте послушаем результаты.

Воробьев В.С:

Уважаемы коллеги! Состав совета и число присутствующих не изменилось.

Председатель

23.

Воробьев В.С:

Не изменился и результат. Все проголосовали единогласно.

Председатель

Спасибо. Мы должны утвердить. 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 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
КАНДИДАТА НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 25.12.2019г. № 12

О присуждении Кадатскому Максиму Алексеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Квантово-статистический расчёт термодинамических свойств простых веществ и смесей при высоких плотностях энергии» по специальности 01.04.08 – физика плазмы принята к защите 23.10.2019г., (протокол заседания № 9) диссертационным советом 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 № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Кадатский Максим Алексеевич 1992 года рождения, в 2015 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Работает в должности научного сотрудника лаборатории № 16 – широкодиапазонных уравнений состояния Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2019 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией №16 федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» Хищенко Константин Владимирович.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, эксперт-советник Отдела № 15 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» Шпатаковская Галина Васильевна;

- доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Отдела экстремальных состояний вещества Института проблем химической физики Российской академии наук Острик Афанасий Викторович
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва) в своем положительном заключении, составленном директором института лазерных и плазменных технологий (ЛаПлаз) НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., профессором Кузнецовым А.П. (утвержденном 04.12.2019г. ректором НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н., профессором Стрихановым М.Н.) отметила научную и практическую значимость работы.

Соискатель имеет 21 публикацию в тезисах докладов и 6 опубликованных работ по теме диссертации в реферируемых журналах из списка ВАК:

1) *Kadatskiy M. A., Хищенко К. В.* Термодинамические свойства латуни при высоких температурах в рамках модели Хартри–Фока–Слэтера // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. — 2014. — Т. 4, № 3. — С. 67—73.

2) *Kadatskiy M. A., Khishchenko K. V.* Comparison of Hugoniot calculated for aluminum in the framework of three quantum-statistical models // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 653. — P. 012079.

3) *Kadatskiy M. A., Khishchenko K. V.* Shock compressibility of iron calculated in the framework of quantum-statistical models with different ionic parts // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 774. — P. 012005.

4) *Kadatskiy M. A., Khishchenko K. V.* Theoretical investigation of the shock compressibility of copper in the average-atom approximation // Physics of Plasmas. — 2018. — Vol. 25, no. 11. — P. 112701.

5) *Kadatskiy M. A.* Quantum-statistical calculations of the thermodynamic properties of molybdenum at high energy densities // High Energy Density Physics. — 2019. — Vol. 33. — P. 100700.

6) *Orlov N. Yu., Kadatskiy M. A., Denisov O. B., Khishchenko K. V.* Application of quantum-statistical methods to studies of thermodynamic and radiative processes in hot dense plasmas // Matter and Radiation at Extremes. — 2019. — Vol. 4, no. 5. — P. 054403.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1) **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х.М. Бербекова»** (зав. кафедрой физики наносистем д.ф.-м.н. Савинцев А.П.) – отзыв положительный, с замечаниями:

а) В тексте автореферата нет разъяснения, что за параметр ρ_{00} и, соответственно, что означает в подписи к рисунку 3 выражение $\rho_{00} = \rho_0 = 2.712 \text{ г/см}^3$.

б) На рисунке 3 автором многие источники результатов измерений обозначены чисто символически (например, Волков 1980, Подурец 1994 и т.п.) и не расшифрованы в примечаниях, как, например, Ragan 1982, Ragan 1984.

в) В издании отсутствуют пробелы между подписью к рисунку и текстом автореферата, что усложняет знакомство с материалом.

2) **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Саровский физико-технический институт — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования**

«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СарФТИ НИЯУ МИФИ) (доцент кафедры прикладной математики к.ф.-м.н. Вронский М.А.) – отзыв положительный, с замечаниями:

а) Формулы модели ХФС раздела 1 первой главы фактически полностью (за исключением формулы (1.26) для плотности числа состояний промежуточной группы) взяты из [Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы. М.: Физматлит. 2000.] Наиболее важную часть реализации модели представляют особенности алгоритмов. Описание таких особенностей полностью отсутствует в диссертации. Без такого описания (хотя бы некоторых особенностей) трудно сделать вывод о том, что сделано автором самостоятельно.

б) Промежуточные состояния с указанными граничными условиями не ортогональны состояниям дискретного спектра (с выбранным граничным условием $R_{nl}(r_0) = 0$). Ортогональность состояний существенно используется при сведении многоэлектронной задачи к одноэлектронной. Исследование того, велика ли степень этой неортогональности, и как она может повлиять на рассчитанные термодинамические функции, в диссертации отсутствует.

в) Формулы для нахождения давления и внутренней энергии электронной компоненты взяты из [Никифоров А.Ф., Новиков В.Г., Уваров В.Б. Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы. М.: Физматлит. 2000.]. Вместе с тем, известно, что расчёт по этим формулам имеет ряд серьёзных трудностей, которые в том числе приводят к отказу (во всяком случае для давления) от формул типа (1.30а), а применению теоремы вириала и иных подходов (см., например, [Lieberman D. A. Self-consistent field model for condensed matter // *Physical Review B*. 1979. V. 20, No. 12. P. 4981-4989.],[Овечкин А. А., Новиков В. Г., Грушин А. С. Особенности вычисления энтропии в моделях самосогласованного поля // *Теплофизика высоких температур*. 2011. Т. 49, № 6. С. 845—855.], ссылки на которые есть в диссертации, а также [Новиков В.Г., Овечкин А.А. Вычисление давления в модели ограниченного атома. М.: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. 2009. *Препринт № 77. 26 с.*]). Никаких упоминаний о такого рода сложностях и путях их преодоления в диссертации нет.

г) При рассмотрении вклада в термодинамические функции ионов считается, что они имеют заряд Z_0 , равный средней степени ионизации плазмы. Это означает, что ионы рассматриваются вместе со связанными электронами. С другой стороны, вклад связанных электронов уже учтён. Таким образом, возможен двойной учёт некоторых составляющих.

д) В диссертации много говорится об эталоне. При этом, подтверждений более высокого качества получаемых уравнений состояния (по сравнению с моделями ТФ или ТФП), по-моему, недостаточно. Наличие осцилляций термодинамических величин, которые трактуются, как оболочечные эффекты, таким подтверждением не является. Например, из рисунка 1.2 (а также других) видим значительное отклонение результатов расчётов по реализованной модели ХФС там, где ТФ и ТФП - близки (при температурах выше 100 эВ), а значит, квантовые поправки - малы и ХФС также должна давать результаты, близкие к ТФ.

е) По моему мнению, в диссертации недостаточно отражены результаты, полученные В. Г. Новиковым и А. С. Грушиным (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН), очень близкие к тематике диссертации.

3) Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА») (старший научный сотрудник подразделения №171 - лаборатории компьютерного материаловедения Центра фундаментальных и прикладных исследований ФГУП «ВНИИА» к.ф.-м.н. Дьячков С.А.) – отзыв положительный, с замечанием:

а) Квантово-статистические модели, используемые диссертантом для расчетов и реализованные в авторском программном коде, очень сложны с точки зрения используемых численных алгоритмов, однако эти детали совершенно не раскрыты

автором. В частности, не раскрываются детали программной реализации (языки программирования, используемые библиотеки, архитектура программы), а также характерное время расчета одной точки в таблице широкодиапазонного уравнения состояния.

4) Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (начальник лаборатории научно-исследовательского отделения №4, к.т.н. Смирнов Е.Б.) – отзыв положительный, без замечаний.

5) Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (руководитель отдела взаимодействия когерентного излучения с веществом, д.ф.-м.н. Красюк И.К.) – отзыв положительный, без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

д.ф.-м.н. **Шпатаковская Галина Васильевна** является признанным специалистом в области разработки квантово-статистических моделей строения вещества, использующих приближение среднего атома.

1) Shpatakovskaya G. V., Karpov V. Ya. "Shell correction to the Thomas—Fermi statistical model of plasma with different atomic composition at high and low temperatures." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 653. No. 1. IOP Publishing, 2015.

2) Shpatakovskaya G. V., Karpov V. Ya. "Atomic number scaling of electron spectra in the free atoms." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 774. No. 1. IOP Publishing, 2016.

3) Шпатаковская Г. В. "Квазиклассический метод анализа и оценки орбитальных энергий связи в многоэлектронных атомах и ионах." *Успехи физических наук* 189.2 (2019): 195-206.

д.т.н., профессор **Острик Афанасий Викторович** является признанным специалистом в области построения широкодиапазонных уравнений состояния композитных материалов.

1) Ostrik A. V. "Numerical modeling of droplets growth and their thermal radiation from metallic targets heated by heavy ion beams." 2015 IEEE International Conference on Plasma Sciences (ICOPS). IEEE, 2015.

2) Ким В. В., Ломоносов И. В., Острик А. В. "Численная реализация табличных уравнений состояния компонентов композиционных материалов в современных гидрокодах." *Конструкции из композиционных материалов* 2 (2015): 39-45.

3) Острик А. В., Бугай И. В. "Моделирование переноса потока ионизирующего излучения в многослойных преградах." *Информационно-технологический вестник* 3 (2018): 143-157.

В **Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»** проводятся как фундаментальные, так и прикладные исследования по направлениям, соответствующим специальности физика плазмы. В Институте лазерных и плазменных технологий (ЛаПлаз) ведутся интенсивные работы по изучению поведения веществ, находящихся в состояниях с высокой плотностью энергии.

1) Богданова Ю. А., Губин С. А., Викторов С. Б., Губина Т. В. "Теоретическая модель уравнения состояния двухкомпонентного флюида с потенциалом $\exp(-6)$ на основе теории возмущений." *Теплофизика высоких температур* 53.4 (2015): 506-516.

2) Bogdanova Y. A., Gubin S. A., Victorov S. B., Anikeev A. A. "Application of a Theoretical Model of State Equation for Calculation of N_2 , O_2 , and CO_2 Shock Adiabatic Curves." *Russian Physics Journal* 59.2 (2016): 190-196.

3) Kozlova S. A., Gubin S. A., Maklashova I. V., Selezenev A. A. "Molecular-dynamic simulations of the thermophysical properties of hexanitrohexaazaisowurtzitane single crystal

at high pressures and temperatures." Russian Journal of Physical Chemistry A 91.11 (2017): 2157-2160.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- 1) Предложен алгоритм расчёта термодинамических зависимостей, позволяющий получить новую информацию об уравнении состояния простых веществ и смесей в области горячей плотной плазмы (в диапазоне температур от 0.1 до 10^4 эВ, и в диапазоне плотностей от ρ_0 до $6\rho_0$). В широком диапазоне температур (от 0.1 до 10^4 эВ) получены значения изохорической и изобарической электронной теплоёмкости алюминия ($\rho = 2.712$ г/см³) и молибдена ($\rho = 10.22$ г/см³) по моделям Томаса-Ферми, Томаса-Ферми с поправками и Хартри-Фока-Слэтера. С помощью рассчитанных зависимостей может быть получена оценка электронной температуры, получаемой в экспериментах по изучению взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с веществом.
- 2) Построены ударные адиабаты сплошных и пористых образцов Al, Fe, Cu, Mo и SiO₂ в диапазоне давлений от 100 до 10^7 ГПа, рассчитанные по варианту модели Хартри-Фока-Слэтера, в котором автоматически определяется число состояний образующих зонную структуру электронов, с учётом вклада ионной подсистемы по моделям идеального газа Больцмана (для простых веществ и соединений) и заряженных твёрдых сфер (для простых веществ).
- 3) Предложены аппроксимации ударных адиабат алюминия, железа, меди и молибдена, рекомендованные для проведения интерпретации результатов экспериментов, где перечисленные вещества используются в качестве эталонов. На основе полученных аппроксимаций дана оценка области применимости модели Хартри-Фока-Слэтера с учётом ионной подсистемы по модели заряженных твёрдых сфер.
- 4) По моделям Томаса-Ферми с поправками и Хартри-Фока-Слэтера с учётом вклада ионной подсистемы по моделям идеального газа Больцмана и заряженных твёрдых сфер получены зависимости относительного изменения скорости фронта ударных волн при прохождении границы раздела двух веществ: Fe–Al, Mo–Al, SiO₂–Al, Al–Mo, Fe–Mo и Pb–Cu. Это позволило локализовать область параметров, где можно экспериментально подтвердить наличие наблюдаемых в теории осцилляций. Дана оценка (равная 0.5%) необходимой относительной точности измерения волновых скоростей, при которой возможно экспериментальное подтверждение наличия наблюдаемых в теории осцилляций термодинамических зависимостей.
- 5) На основе модели Хартри-Фока-Слэтера с учётом вклада ионной подсистемы по модели заряженных твёрдых сфер проведена интерпретация экспериментальных данных других авторов по относительным измерениям сжимаемости Al в сильных ударных волнах с использованием эталонов из Fe и Mo.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- 1) на основе сравнения результатов расчётов зависимости относительного изменения скорости фронта ударных волн при прохождении границы раздела алюминия и железа по моделям Хартри-Фока-Слэтера и Томаса-Ферми с поправками получено теоретическое подтверждение наличия осцилляций значений плотности вещества на ударных адиабатах при высоких давлениях.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается:

- полученной оценкой необходимой относительной точности измерения волновых скоростей, при которой возможно экспериментальное подтверждение наличия наблюдаемых в теории осцилляций значений плотности вещества на ударных адиабатах при высоких давлениях;

- полученными аппроксимациями ударных адиабат эталонных веществ (Al, Fe, Cu и Mo);
- проведённой интерпретацией экспериментальных данных других авторов по относительным измерениям сжимаемости Al в сильных ударных волнах с использованием эталонов из Fe и Mo.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, в которых проводятся исследования поведения веществ в экстремальных условиях, в частности, в Объединенном институте высоких температур РАН, в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, в Институте проблем химической физики РАН, в Федеральном государственном унитарном предприятии «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, в Московском физико-техническом институте (национальном исследовательском университете), в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ».

Достоверность результатов исследования подтверждается сравнением полученных результатов с большим массивом доступных экспериментальных данных и с результатами аналогичных расчётов по другим теоретическим моделям.

Личный вклад соискателя является определяющим. Представленные расчётные алгоритмы реализованы соискателем в виде программ. Все основные результаты диссертации получены соискателем самостоятельно.

Апробация результатов исследования проводилась на 28 российских и международных конференциях. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 25.12.2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Кадатскому Максиму Алексеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 23 человек, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 — «Физика плазмы» и 13 докторов наук по специальности 01.04.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника», участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 23, против -0, недействительных бюллетеней -0.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02
д.ф.-м.н., профессор



Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02
д.ф.-м.н.



Васильев М.М.
25.12.2019г.