

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 17 октября 2018 г. (протокол № 17)

Защита диссертации Ларкина Александра Сергеевича  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
«Численное моделирование термодинамических свойств кулоновских систем  
частиц в вигнеровской формулировке квантовой механики»

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Москва – 2018

## 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 № 17 от 17 октября 2018 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 22 человека, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 11 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 к.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Фортов В.Е.	Академик	01.04.08	Отсутствует
2	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, профессор	01.04.14	Присутствует
3	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
4	Васильев М.М.	к.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, 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., профессор	01.04.08	Присутствует
20	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н.	01.04.14	Отсутствует
21	Лагарьков А.Н.	Академик	01.04.08	Отсутствует
22	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.14	Отсутствует
23	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	01.04.14	Присутствует
24	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Присутствует
25	Петров О.Ф.	Чл.-корр. РАН, профессор	01.04.08	Присутствует
26	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, профессор	01.04.14	Отсутствует
27	Савватимский А.И.	Д.т.н.	01.04.14	Присутствует
28	Сон Э.Е.	Академик	01.04.08	Присутствует
29	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	01.04.08	Отсутствует
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 1.2.1.1 – плазменно-пылевых процессов Научно-исследовательского центра теплофизики экстремальных состояний (НИЦ-1 ТЭС) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) Ларкина Александра Сергеевича на тему «Численное моделирование термодинамических свойств кулоновских систем частиц в вигнеровской формулировке квантовой механики». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 1.2.1.1. – плазменно-пылевых процессов НИЦ-1 ТЭС ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, [jiht.ru](http://jiht.ru)).

### **Научный руководитель:**

Филинов Владимир Сергеевич – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории 1.2.1.1 – плазменно-пылевых процессов Научно-исследовательского центра теплофизики экстремальных состояний Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

### **Официальные оппоненты:**

Петрушевич Юрий Васильевич - гражданин РФ, д.ф.-м.н., начальник лаборатории физико-химической кинетики и распространения излучения в газах и плазме Государственного научного центра Российской Федерации Троицкого института инновационных и термоядерных исследований (ГНИЦ РФ ТРИНИТИ; Россия, 142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12)

Петров Юрий Васильевич – гражданин РФ, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник сектора плазмы и лазеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН; Россия, 142432, г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А)

### **Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН; Россия, 108840 г. Москва, г.Троицк ул. Физическая, 5)

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н. Петрушевич Ю.В. и д.ф.-м.н. Петров Ю.В., научный руководитель Ларкина А.С. д.ф.-м.н. Филинов В.С.

## СТЕНОГРАММА

### **Председатель**

У нас сегодня насыщенная повестка, из 6 пунктов, поэтому давайте перейдём прямо к двум основным, это защиты. И первым защищается Ларкин Александр Сергеевич. Пожалуйста, вы должны нас ознакомить, Михаил Михайлович.

### **Ученый секретарь**

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

### **Председатель**

Я так понимаю, что вопросов нет, поэтому, Александр Сергеевич, пожалуйста, постарайтесь уложиться в означенные 20 минут.

### **Ларкин А.С.**

*(Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Ларкина А.С. прилагается)).*

### **Председатель**

Спасибо. Вы присаживайтесь, пожалуйста... Хотя нет, пока не присаживайтесь, потому что сейчас вопросы к вам будут. Пожалуйста, какие вопросы к Александру Сергеевичу?

### **Амиров Р.Х.**

Пожалуйста, просьба вернуться к слайду, где в водородной плазме у вас появляется хвост для распределения электронов, а для протонов — нет. Да, вот этот. Там вы ссылались на работу Старостина, что у него тоже обогащение функции распределения за счёт квантовых эффектов. В работах Старостина было показано, что это приводит к увеличению константы скорости реакции, например, в ударных волнах и во всём прочем. Мой вопрос в следующем. В каких макроскопических параметрах этот хвост распределения электронов себя проявляет? То ли это какие-то переносные свойства, транспортные свойства. Конкретно, как это можно проверить, сравнить, появление этого хвоста?

### **Ларкин А.С.**

Этот хвост должен приводить к существенному росту каких-то констант реакций в плазме, именно, констант скоростей.

### **Амиров Р.Х.**

Здесь у вас водородная плазма, она такая примитивная в общем-то по составу, конкретные реакции с участием электрона надо указывать. Так вот сразу в голову не приходит, да?

### **Ларкин А.С.**

Боюсь, что нет.

### **Амиров Р.Х.**

И второй вопрос, чисто технический. Вы разработали несколько методов, по крайней мере, три. Их программная реализация, какие компьютеры, время счёта... просто поясните, какие ресурсы для этого требуются, какое «железо», и т.д. Чтобы понять уровень чисто технической реализации всех этих методов.

**Ларкин А.С.**

Все программы были написаны на Фортране, расчёт вёлся на одном процессоре, то есть мы её не параллелили, и расчёт, скажем, где-то для сотни частиц, то есть сто электронов и сто протонов или сто дырок, занимает примерно пол суток в таких условиях.

**Председатель**

Ещё, пожалуйста.

**Грязнов В.К.**

Вы показали, что у вас появляется молекула  $H_2^+$ . Можно ли это соотнести с физической плотностью, т.е. с массовой плотностью. Где это может проявиться на, скажем, водородной плазме?

**Ларкин А.С.**

Для этого нужно пересчитать коэффициенты гамма и хи в плотность и температуру. С ходу я этого не могу сделать, потому что там алгебраические вычисления, вычисления степеней... к сожалению, в уме не могу.

**Грязнов В.К.**

То есть вы это просто не делали, да?

**Ларкин А.С.**

Нет. Мы характеризовали плазму здесь, как это часто делается в литературе при подобных исследованиях Монте Карло, именно параметрами неидеальности и вырождения.

**Грязнов В.К.**

То есть плазменными параметрами, понятно.

**Председатель**

Так, пожалуйста, ещё вопросы.

**Синкевич О.А.**

Можно ещё один?

**Председатель**

Да.

**Синкевич О.А.**

Скажите пожалуйста, можно ли здесь предположить образование отрицательного иона водорода? Когда атом «схватит» ещё один электрон?

**Ларкин А.С.**

Из анализа корреляционных функций протон-протон здесь это не наблюдается.

**Синкевич О.А.**

При тех значениях параметра вырождения, при которых вы считали, правильно?

**Ларкин А.С.**

Судя по всему, нет. Мы такого не видели в достаточно широком диапазоне параметров.

**Синкевич О.А.**

Спасибо.

**Председатель**

Ещё? Если вопросов нет, я хотел бы уточнить. Там среди выносимых на защиту было написано, что разработано три метода и, соответственно, указаны области их применимости. Вот насчёт областей у меня не отложилось всё-таки, какой же метод в какой области вы предлагаете использовать. В частности, линейные и гармонические, ограничение по какому параметру? И, соответственно, какие ограничения по импульсу? Вы говорили, что при больших импульсах одноимпульсное приближение плохое. До каких импульсов оно всё-таки работает?

**Ларкин А.С.**

Прежде всего про одноимпульсный метод. Здесь функция распределения. Он работает практически когда от максимума функция упадёт в 100 раз. То есть при больших импульсах он уже не работает.

**Председатель**

Эти 100 раз — какой-то параметр есть, или просто это ваш опыт?

**Ларкин А.С.**

Нет, это опыт. Дальше быстрое преобразование Фурье приводит к артефактам. Оно не позволяет изучать распределение по импульсам.

**Председатель**

А линейное и гармоническое приближение?

**Ларкин А.С.**

Линейное и гармоническое... их области применимости судя по всему одинаковы. Гармоническое точнее... В диссертации приводится грубая оценка применимости гармонического приближения... в принципе, это рассматриваемая область состояний. Когда связанных состояний мало, тогда линейное и гармоническое приближения работают. Если их много, то необходимо уже более точное разложение.

**Председатель**

Я так понимаю, что для гармонического приближения вам трудно сказать параметр, потому что вы следующего не писали. Но для линейного, если вы написали и линейное, и гармоническое, ведь можно указать параметр, для которого линейное годится?

**Ларкин А.С.**

При наших расчётах мы особой разницы не видели между ними.

**Председатель**

Но тогда вроде как получается, зачем гармоническое приближение, не совсем понятно. Они работают в одной и той же области, а применимость гармонического вы не указываете.

**Филинов В.С.**

Оно подтверждает линейное.

**Председатель**

Но по какому параметру разложили, тогда не понятно вроде, да? Хорошо, спасибо. Больше вопросов нет?

**Храпак А.Г.**

Маленький вопрос можно?

**Председатель**

Да, пожалуйста.

**Храпак А.Г.**

Вы утверждали, что решена проблема знака для фермиевских систем. Не могли бы вы «на пальцах» объяснить, в чём суть этой проблемы знака, и каким способом, опять-таки «на пальцах», вам удалось это преодолеть?

**Ларкин А.С.**

Фермионная проблема знака, вообще как проблема знака, это принципиальная проблема при расчётах методом Монте Карло, когда подынтегральное выражение, то есть типа функции распределения, в данном случае функция Вигнера, является знакопеременной. Поэтому его нельзя интерпретировать как плотность вероятности, и приходится делать следующее: брать модуль от этого выражения, и рассматривать его как положительную плотность вероятности, и выносить отдельно знак этого распределения. Тогда при вычислении среднего значения оператора получается формула: сверху усредняется оператор с весом в виде знака, а в знаменателе стоит среднее значение знака по этой же выборке. При этом, если знак сильно осциллирует, то знаменатель получается очень мал, и погрешность растёт. Причём она растёт в случае вырожденных фермионов, если считать «в лоб» с помощью перестановок, асимптотически. Именно из-за того, что приходится делить на малый знак выражения. С помощью обменных псевдопотенциалов, идея состояла в том, что если мы усредняем по ячейкам фазового пространства, то удаётся сделать подынтегральное выражение положительным, и собрать его в такой потенциал. То есть здесь проблемы знака в принципе нет, поскольку все усредняемые выражения положительны, и средний знак вычислять не нужно. Но при этом, конечно, приходится платить ценой уменьшения точности, так как рассматриваются лишь парные перестановки.

**Храпак А.Г.**

Спасибо.

**Председатель**

Ясно, спасибо. Если больше вопросов нет, тогда мы двигаемся дальше. Владимир Сергеевич, вы, похоже, должны сказать несколько слов о соискателе.

**Филинов В.С.**

Я должен сказать, что Александр Ларкин, конечно, человек очень увлекающийся. За время аспирантуры он проявил себя как энтузиаст науки, он с большим интересом относился ко всем этим проблемам, и, кроме того, он проявил большие способности к аналитическим расчётам и численным. Я должен сказать, что он получил очень интересные результаты в данной работе. Например, проблема знака висит уже 50 лет и существенно ограничивает расчёты с помощью Монте Карло. Здесь удалось значительно продвинуться по параметру вырождения. Я думаю, что Саша в дальнейшем будет заниматься наукой и дальше и вполне заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата наук.

### **Председатель**

Спасибо большое. Я думаю, что вопросов нет, поскольку, действительно, доложенная работа отражает в полной мере то, что сказал Владимир Сергеевич. Значит, давайте ознакомимся с отзывами, которые поступили на диссертацию. Михаил Михайлович, пожалуйста.

### **Ученый секретарь**

*(Зачитывает отзыв ведущей организации на диссертацию, а также отзывы, поступившие на автореферат. Отзывы прилагаются к делу).*

### **Председатель**

Спасибо, Михаил Михайлович. Александр Сергеевич, вы видите: тут часть вопросов на одну и ту же тему. В частности, по поводу проблемы знака вы уже отвечали, а то, что касается примеров по бозонам — это тоже... то есть, соедините всё вместе, не надо на каждое замечание отвечать по многу раз.

### **Ларкин А.С.**

Прежде всего, насчёт бозонного потенциала мы не успели провести подобные расчёты. Это запланировано на будущее, потому что мы в основном сосредоточились на фермионных системах, поскольку именно они имеют наибольшее приложение к плазме, которой мы прежде всего интересовались. Бозонные системы были для нас менее интересны, по этому мы ими пока что не занимались.

Далее, что касается сходимости метода. В автореферате я был сильно ограничен в объёме, поэтому там не приводится исследование сходимости в зависимости от числа частиц в ячейке, не приводится зависимость от числа звеньев траектории. Это всё рассмотрено в диссертации, поскольку это представляет значительно меньший интерес, чем, например, функции распределения. То же самое касается термодинамических величин. Поскольку здесь давление и энергия в основном подтверждают результаты расчёта другими методами, поэтому в автореферат я не стал это включать. В диссертации можно найти это всё подробно, с таблицами энергии и давления. Далее, что касается...

### **Филинов В.С.**

Среднего знака.

### **Председатель**

Средний знак мы уже обсудили. Я думаю, что тут полная ясность есть, так что, давайте, опустим этот вопрос.

### **Ларкин А.С.**

Что касается упоминания в обзоре литературы других методов, кроме методов Монте Карло. Это, к сожалению, слишком бы увеличило объём обзора литературы, поскольку сам материал по методам Монте Карло весьма и весьма обширный. Существует большое число методов, как коллега из Германии в отзыве упомянул. Действительно, есть и методы РВ-РМС. Поэтому рассматривать методы типа функционала плотности не представлялось возможным. Тем более, эти методы используются как правило при больших вырождениях. У нас вырождения до 10, а там значительно более сильные вырождения.

### **Председатель**

А то что функцию Вигнера можно получить пространственным преобразованием Фурье и тогда вернуться к функциям распределения?



**Ларкин А.С.**

Тут дело в том, что подавляющее большинство методов Монте Карло (стандартных), они рассчитывают статсумму. При вычислении статсуммы проводится суммирование только диагональных элементов матрицы плотности, то есть вычисляется её след. В то же время для вычисления функции Вигнера необходимы и недиагональные элементы, то есть нужно знать полную матрицу плотности. Таким образом, в стандартных методах не содержится полной информации, которую можно получить с помощью функции Вигнера.

**Председатель**

Я думаю, мы получили ответ на те замечания, что были сделаны. Тогда слово официальным оппонентам, Юрий Васильевич... где у нас Юрий Васильевич?

**Филинов В.С.**

У нас два Юрия Васильевича.

**Председатель**

Что?

**Филинов В.С.**

Два Юрия Васильевича.

**Председатель**

А, я Петрушевича имею в виду. Юрий, извините. Смотрю в глаза одному из них.

**Петрушевич Ю.В.**

Мне придётся повторить некоторые вещи, которые сегодня были сказаны. Значит, целью диссертационной работы является разработка новых численных методов, позволяющих рассчитывать как термодинамические, так и кинетические свойства сильнонеидеальных кулоновских систем. В диссертации были рассмотрены следующие задачи, сформулированные автором. Получить представление для функции Вигнера системы заряженных частиц в условиях термодинамического равновесия. Разработать численный метод Монте Карло, позволяющий рассчитывать термодинамические величины и средние значения квантовых операторов. Провести расчёты термодинамических и кинетических свойств водородной плазмы. Актуальность не вызывает сомнений. Это расчёт термодинамических и кинетических свойств сильнонеидеальных кулоновских систем, процессов, протекающих в экстремальных средах, в ударных волнах, недрах звёзд. Кроме того, такие экстремальные состояния возникают в экспериментах по ударному сжатию. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Кроме того, один раздел посвящён подробному обзору литературы по рассмотренной в диссертации тематике. В первой главе кратко приводятся необходимые сведения из квантовой статистики, даётся стандартное определение функции Вигнера для такого ансамбля и приводится формула для вычисления средних по ансамблю значений. В диссертации не просто используется функция Вигнера, а находится вариант приближения, который позволил бы использовать эту функцию в численных расчётах в виде интегралов по траекториям для бозонных и фермионных систем. Вводится одноимпульсный подход к вычислению средних значений операторов и функций распределения. Дальнейшее упрощение модели приводит к линейному и гармоническому приближению для функции Вигнера. Во второй главе рассматриваются методы численного моделирования термодинамических свойств неидеальных квантовых систем частиц, основанные на функции Вигнера. Детально рассматриваются созданные диссертантом численные модели. Обсуждается сходимость и подбор технических параметров в различных ситуациях. Оценки этих параметров

определяются простыми критериями: малая ошибка расчёта и уменьшение нагрузки и времени работы ЭВМ. Количество параметров, которые рассматриваются при проведении численных расчётов и варьируются, кажется слишком большим. Было бы правильным представить программные продукты с автоматическим подбором значений для большинства параметров. В третьей главе представлены результаты тестовых расчётов, рассматриваются простые тесты. Например, одна частица во внешнем поле для одномерного потенциала. Вычисляются формальные термодинамические свойства частицы, движущейся во внешнем потенциальном поле. Результаты, полученные с помощью этих программ, сопоставляются с прямыми квантово-механическими расчётами и результатами других численных методов. Это является способом проверки проделанных приближений, которые сделаны для возможности вычисления с помощью функции Вигнера. В четвёртой главе представлены результаты расчёта термодинамических и кинетических свойств сильнонеидеальных кулоновских систем на примере водородной и электрон-дырочной плазмы, производится их сопоставление с результатами других авторов. Из недостатков диссертации можно ко всему прочему отметить достаточно редкие ссылки на работы других авторов. Знакомство с литературой, как сказано, отведено в отдельную главу в начале диссертации. Складывается впечатление когда читаешь, что эти все результаты были сделаны автором диссертации, что неправильно, особенно в первой части диссертации, где рассматриваются приближения функции Вигнера. Основные результаты научной работы получены впервые и отличаются научной новизной. Теоретическая и практическая значимость работы: полученное в работе представление функции Вигнера в виде интегралов по траекториям может быть полезно как для численного моделирования, так и для аналитического исследования. Учёт обменного взаимодействия бозонов и фермионов в виде обменного псевдопотенциала позволяет существенно сократить время расчёта в условиях слабого и умеренного вырождения, и позволяет в ряде случаев избежать фермионной проблемы знака и более эффективно исследовать неидеальные вырожденные фермионные системы. В работе были исследованы равновесные функции распределения по импульсам сильнонеидеальной двухкомпонентной кулоновской системы. Эти данные необходимы для расчёта пороговых энергий и констант скоростей реакций в плазменных средах, что необходимо при изучении процессов горения, детонации, ядерного синтеза при высоких давлениях. Результаты этих исследований могут быть использованы в организациях, где проводятся исследования вещества в экстремальном состоянии. Апробация работы была проведена на многочисленных конференциях (около 10), посвящённых проблемам физики плазмы, список конференций приведён в диссертации. Основные результаты изложены в 9 печатных изданиях, рекомендованных ВАК. Личный вклад автора не вызывает сомнений, что подтверждается его участием в основных научных работах, на которых основана диссертация, основные её элементы были получены автором лично или с его участием. Диссертация «Численное моделирование термодинамических свойств кулоновских систем частиц в вигнеровской формулировке квантовой механики» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным в пункте 9 в Положении о порядке присуждения учёных степеней. Её автор Ларкин Александр Сергеевич достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

### **Председатель**

Спасибо. Я так понимаю, что вопросов, наверное, нет? Спасибо большое. Тогда вам предоставляется возможность ответить на замечания, которые были в отзыве.

### **Ларкин А.С.**

Прозвучало замечание, что в первой главе приближения функции Вигнера уже были в

литературе. Мы их получали сами, по крайней мере ничего такого не видели. Это было оригинальное исследование наше: линейное приближение, гармоническое приближение, одноимпульсный подход. Я не могу согласиться с тем, что мы откуда-то это взяли. Это наши результаты. Что касается программного кода, да, действительно, это планируется сделать и привести к аккуратному, законченному виду. Пока что это код для собственного пользования, на стороне его использовать тяжело.

**Председатель**

Но у вас, собственно, не было задачи сделать код для общего пользования?

**Ларкин А.С.**

Нет, пока не было.

**Председатель**

Хорошо. Ещё что-нибудь хотите сказать, Александр Сергеевич?

**Ларкин А.С.**

Нет.

**Председатель**

Всё, спасибо, тогда мы переходим ко второму оппоненту. Юрий Васильевич, на этот раз Петров. Юрий Васильевич, если можно, учтите, что мы с содержанием диссертации уже ознакомлены.

**Петров Ю.В.**

Хорошо. Тогда давайте я замечания сразу... Одно замечание — это, так сказать, пожелание. Автор применяет развиваемый в диссертации подход к термодинамическим свойствам водородной плазмы, хотелось бы, чтобы этот подход был использован применительно к другому, не менее важному объекту — жидким металлам при высоких температурах. Это очень важно при изучении взаимодействия интенсивного лазерного излучения ультракороткой длительности с конденсированным веществом. В применении к так называемым простым металлам с тепловым возбуждением только  $s$ - и  $p$ - электронов может быть прямо рассмотрено изложенными в диссертации методами. Использование численных методов имеет очень большое значение при взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов с веществом. Для того же самого алюминия, тем более натрия, у которого вообще один электрон можно рассматривать... Можно просто взять другой характерный псевдопотенциал, а не тот, который использован в работе, и задача фактически решается и для этого случая тоже. Наконец есть другие замечания, по тексту диссертации. Допустим, здесь в презентации длина волны Де Бройля была написана правильно, но в диссертации почти нигде она правильно не написана. Здесь под корнем стоит  $\hbar$  квадрат, а в большинстве формул диссертации под корнем стоит просто  $\hbar$ . Дальше, тут речь идёт о фермиевской функции распределения  $F(p)$ . Если понимать, как там написано, что это есть фермиевская функция от модуля  $p$ , то там должно быть ещё  $p$  квадрат. Если понимать буквально, то  $p$  квадрат должен быть, а у него это нигде не написано. Надо понимать, значит, что здесь нечто другое, а не фермиевская функция распределения. Дальше, во многих формулах, например, на странице 25, в первой строке, вместо минуса поставлен плюс. Есть лишний минус на странице 38. Дальше, очень странно, что на странице 43 бозонный обменный псевдопотенциал получается из (1.1), а на самом деле он получается из (1.75). Например, на странице 76 написано «параметр  $a$  и  $c$ », а на самом деле есть параметр  $a$  с чертой и  $c$  с чертой, должны быть они. То есть, есть такие вещи, и довольно много, которые не облегчают чтения диссертации. Это, конечно,

чисто технические вещи, но хотелось бы, чтобы их не было. Общее заключение: диссертационная работа Александра Сергеевича Ларкина «Численное моделирование термодинамических свойств кулоновских систем частиц в вигнеровской формулировке квантовой механики» удовлетворяет, безусловно, всем требованиям ВАК и Положению о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.08 — физика плазмы. Автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

#### **Председатель**

Спасибо большое, Юрий Васильевич, за тщательное прочтение диссертации. Я думаю, что ваши замечания будут крайне полезны соискателю в дальнейшем, чтобы он волну Де Бройля писал правильно. Так, пожалуйста, ответьте на те замечания, которые были... Я думаю, не на опечатки, а если по существу хотите что-то сказать... Мне кажется, предложение оппонента относительно использования вашего метода более широко... Как вы относитесь к этому? Оно выглядит очень привлекательным.

#### **Ларкин А.С.**

Я благодарен за это предложение, поскольку это действительно большая область, где имеется много экспериментальных данных и теоретических расчётов. Там можно в том числе и методы проверить гораздо более тщательно, поскольку в той же водородной плазме, в рассмотренной области, не очень много сведений в литературе. Эта область очень велика и я благодарю за подобное замечание. Мы рассмотрим такие системы.

#### **Председатель**

Хорошо. Надеюсь, что с замечаниями, связанными с вашими опечатками, вы согласны. Хорошо, мы переходим к вольной дискуссии. Пожалуйста, кто хочет высказаться на тему обсуждаемой работы? Есть желающие? Если нет, то я могу рассматривать только как то, что вопрос достаточно ясен. Мне представляется, что работа, несомненно, хорошая, полноценная и интересная, поэтому предлагаю всем выразить своё мнение относительно неё. Для этого мы должны выбрать счётную комиссию, и предложения у нас такие: Васильев Михаил Николаевич (председатель счётной комиссии), Грязнов и Храпак. Если нет возражений, то прошу проголосовать. (Счётная комиссия выбирается единогласно). Давайте перейдём тогда к голосованию, и во время голосования мы можем что-то рассмотреть, Михаил Михайлович? Или лучше не путаться, а быстренько закончить с голосованием. Давайте тогда проголосуем дружно и решительно... Разрешите, пока происходит голосование, исправить мой недочёт: я не дал заключительного слова соискателю. Вообще-то он начал своё выступление с благодарности, поэтому... Если хотите, то можете продолжить. Пожалуйста, Александр Сергеевич.

#### **Ларкин А.С.**

Благодарю диссертационный совет. Благодарю оппонентов за рассмотрение моей диссертации, за отзывы. Благодарю моих коллег и особенно моего научного руководителя Филинова Владимира Сергеевича.

*(Проводится процедура тайного голосования).*

#### **Васильев М.Н.**

Докладываю, что при вскрытии урн было обнаружено 22 бюллетеня, при этом было роздано 22 бюллетеня, не розданных бюллетеней оказалось 9. Результаты голосования такие: за — 22, против — нет, недействительных — нет.

## **Председатель**

Давайте сначала утвердим результаты голосования. *(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно)*. И тут же поздравим. Спасибо большое. Нужно её утвердить заключение. *(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения)*. С теми дополнениями и исправлениями, с которыми все согласны. Предлагаю проголосовать. *(Проект заключения принят единогласно)*. На этом первая защита закончилась успешно.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02 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 17.10.2018 протокол № 17

О присуждении Ларкину Александру Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Численное моделирование термодинамических свойств кулоновских систем частиц в вигнеровской формулировке квантовой механики» в виде рукописи по специальности 01.04.08 — Физика плазмы, принята к защите 27.06.2018г., протокол № 13, диссертационным советом 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, <https://jiht.ru>, (495) 485-8345), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 11.04.2012г. № 105/нк.

Соискатель Ларкин Александр Сергеевич 1990 года рождения, в 2014 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» («МФТИ»).

В 2018 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» («МФТИ»).

Диссертация выполнена в Лаборатории № 1.2.1.1 — плазменно-пылевых процессов НИЦ-1 ТЭС Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Работает научным сотрудником Лаборатории № 1.2.1.1 – плазменно-пылевых процессов НИЦ-1 ТЭС Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Филинов Владимир Сергеевич, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, НИЦ-1, Лаборатория №1.2.1.1.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Петрушевич Юрий Васильевич, Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, лаборатория физико-химической кинетики и распространения излучения в газах и плазме, начальник лаборатории;

доктор физико-математических наук Петров Юрий Васильевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук, сектор плазмы и лазеров, старший научный сотрудник;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), г. Москва, г. Троицк, в своем положительном заключении, составленном заведующим лабораторией спектроскопии наноструктур, кандидатом физико-математических наук, профессором Лозовиком Юрием Ефремовичем (диссертационная работа Ларкина А.С. заслушана и одобрена на заседании лаборатории спектроскопии наноструктур Института спектроскопии РАН, протокол N 2, 05.09.18), указала, что диссертационная работа Ларкина А.С. является самостоятельным исследованием целого ряда актуальных проблем физики плазмы, квантовой статистической механики и численного моделирования. Разработанные численные методы могут быть полезны при изучении термодинамических свойств как плазменных сред, так и прочих многочастичных систем. Полученные результаты для распределений по импульсам представляют несомненный интерес как с точки зрения термодинамики, так и для вопросов кинетики реакций в плазме. Диссертация «Численное моделирование термодинамических свойств кулоновских систем частиц в вигнеровской формулировке квантовой механики» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г.

Соискатель имеет 9 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК Минобрнауки РФ:

1. Larkin A.S., Filinov V.S., Fortov V.E. Path Integral Representation of the Wigner Function in Canonical Ensemble // Contributions to Plasma Physics. 2016. Vol. 56. P. 187-196.
2. Larkin A.S., Filinov V.S., Fortov V.E. Momentum distribution functions of strongly correlated systems of particles: Wigner approach and path integrals // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 774. P. 012146.
3. Larkin A.S., Filinov V.S. Phase Space Path Integral Representation for Wigner Function // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2017. Vol. 05. P. 392-411.
4. Larkin A.S., Filinov V.S., Fortov V.E. Solution of the sign problem in pair approximation // Mathematica Montisnigri. 2017. Vol XXXIX. P. 30-41.
5. Larkin A.S., Filinov V.S. Momentum distribution functions of weakly-degenerate hydrogen plasma // Mathematica Montisnigri. 2017. Vol XL. P. 55-67.
6. Larkin A.S., Filinov V.S., Fortov V.E. Peculiarities of momentum distribution functions of strongly correlated charged fermions // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. 2017. Vol 51. P. 035002.
7. Larkin A.S., Filinov V.S., Fortov V.E. Pauli blocking by effective pair pseudopotential in degenerate Fermi systems of particles // Contributions to Plasma Physics. 2017. Vol 57. P. 506-511.
8. Larkin A.S., Filinov V.S. Quantum tails in the momentum distribution functions of non-ideal Fermi systems // Contributions to Plasma Physics. 2018. Vol 58. P. 107—113.
9. Filinov V.S., Larkin A.S. Electrical conductivity of strongly correlated plasma media // Mathematica Montisnigri. 2017. Vol XLI. P.112-122.

На автореферат поступили отзывы:

1. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (профессор физического факультета, доктор физико-математических наук Бычков Владимир Львович) – отзыв положительный, с замечаниями:  
- Недостаточно подробное освещение термодинамических свойств электрон-дырочной плазмы, а именно, не представлены зависимости давления и внутренней энергии от плотности и температуры.

- В работе было проведено тестирование обменного псевдопотенциала только для фермионов. Бозонный псевдопотенциал, хотя и был предложен, на практике проверен не был.

2. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (профессор физического факультета, доктор физико-математических наук Воронцов-Вельяминов Павел Николаевич) - отзыв положительный, с замечаниями:

- Недостаточное освещение исследования сходимости разработанных численных методов в зависимости от числа частиц в расчётной ячейке, её размеров и дискретизации траектории, представляющей частицу.

- Не было проведено тестовых расчётов для проверки бозонного «обменного потенциала».

3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (Главный научный сотрудник лаборатории нелинейной динамики, доктор физико-математических наук Волков Николай Борисович) - отзыв положительный, с замечанием:

- На с. 10 не лишне было бы пояснить физический смысл функционала  $J_{a,i}[q,z(t)]$  (формула (10) автореферата).

4. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (Заведующий главным научным сотрудником кафедры Общей Физики и Ядерного Синтеза, доктор физико-математических наук, профессор Елецкий Александр Валентинович) - отзыв положительный, с замечанием:

- Автору следовало бы продемонстрировать действие развитых им методов и выполнить расчёты практически значимых параметров, таких как пороговые энергии и константы скоростей реакций горения, детонации и ядерного синтеза при высоких давлениях в плазменных средах.

5. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (Старший научный сотрудник Отдела Теоретической Физики, кандидат физико-математических наук Рогов Роман Николаевич) - отзыв положительный, с замечанием:

- Отсутствие ссылок на общую теорию квантования с использованием символов операторов, где конструкции типа функции Вигнера возникают естественным образом (например, Ф.А. Березин «Метод вторичного квантования»).

6. Валенсийский политехнический университет

(доктор физико-математических наук Ткаченко Игорь Михайлович) - отзыв положительный, с замечаниями:

- Недостаточно подробное освещение разработанных численных методов. Не представлены (хотя бы кратко) их алгоритмы и исследования сходимости.

- В автореферате приведены только графики функций распределения по импульсам в водородной и электрон-дырочной плазме. Прочие термодинамические величины, вычисленные в работе, здесь не представлены.

7. Кильский университет имени Кристиана Альбрехта (профессор Михаэль Бонитц) - отзыв положительный, с замечаниями:

- На стр. 3 утверждается, что существующие методы РИМС в координатном пространстве не позволяют рассчитывать средние величины операторов, зависящих от импульса. Это неверно. Методы в координатном пространстве позволяют вычислить матрицу плотности, которая через преобразование Фурье приводит к функции Вигнера.

- На стр. 4 утверждается, что одной из целей данной диссертационной работы было «преодоление фермионной проблемы знака» при расчёте функции Вигнера. Однако, это

не показано. В автореферате нет ни одного графика, на котором было бы показано среднее значение знака.

- Существует другой метод РИМС в координатном пространстве (РВ-РИМС), который также позволяет моделировать сильно неидеальную квантовую плазму и не имеет проблемы знака для температур вплоть до половины температуры Ферми. Это следовало бы упомянуть, а также желательно сопоставить результаты с существующими точными результатами РВ-РИМС.

- Автореферат содержит значительное количество численных результатов. К сожалению, не приводится никакой информации о точности — ни систематических ошибок разработанных аппроксимаций, ни статистических ошибок. Также неясно, сколько «бусин» [число промежуточных координат, аппроксимирующих траекторию — прим. Переводчика] было использовано в расчётах и как результаты изменяются при изменении числа «бусин». Для демонстрации точности и надёжности новых методов желательно провести тестовые расчёты и сравнить результаты с существующими результатами других методов, например, для некоторых модельных систем.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что:

- Д.ф.-м.н. Петрушевич Ю.В. является известным учёным в области физики плазмы и лазерной физики, теоретического исследования и численного моделирования процессов переноса излучения в веществе, моделирования процессов кинетики и газодинамики;

1. Дракон А.В., Емельянов А.В., Еремин А.В., Ю.В. Петрушевич, Старостин А.Н., Таран М.Д., Фортон В.Е. Влияние квантовых эффектов на инициирование процессов воспламенения и детонации // ЖЭТФ. 2014. Т. 145. Вып. 5, С. 943.

2. Кочетов И.В., Напартович А.П., Петрушевич Ю.В., Старостин А.Н., Таран М.Д. Расчёт времени теплового воспламенения водородно-воздушных смесей с учётом квантовых поправок // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 4. С. 563-568.

3. Старостин А.Н., Грязнов В.К., Петрушевич Ю.В. Развитие теории распределения частиц по импульсам с учётом квантовых эффектов // ЖЭТФ. 2017. Т. 152. Вып. 6(12). С.1104-1112.

- Д.ф.-м.н. Петров Ю.В. является известным учёным в области квантовой термодинамики и кинетики, физики плазмы, взаимодействия лазерного излучения с конденсированным веществом;

1. Анисимов С.И., Петров Ю.В. Энергии диссоциации и потенциалы ионизации молекул в неидеальной водородной плазме // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 65. Вып. 5. С. 397-401.

2. Петров Ю.В., Иногамов Н.А., Мигдал К.П. Теплопроводность и коэффициент электрон-ионного теплообмена в конденсированных средах с сильно возбужденной электронной подсистемой // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. Вып. 1. С. 24-31.

3. Петров Ю.В., Мигдал К.П., Иногамов Н.А., Анисимов С.И. Процессы переноса в металле с горячими электронами, возбужденными лазерным импульсом // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104. Вып. 6. С. 446-454.

Выбор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт спектроскопии Российской академии наук» («ИСАН») в качестве ведущей организации обусловлен тем, что «ИСАН» является многопрофильной организацией, проводящей обширные исследования, в том числе в области компьютерного моделирования сложных неидеальных квантовых систем. В лаборатории спектроскопии наноструктур проводится математическое моделирование методами молекулярной динамики, Монте-Карло, квантового Монте-Карло, квантовой молекулярной динамики, что близко к теме диссертационного исследования соискателя.

1. Voronova N.S., Elistratov A.A., Lozovik Yu.E. Detuning-controlled internal oscillations in an exciton–polariton condensate // Physical Review Letters. 2015. Vol. 115. P. 186402.



2. Elistratov A.A., Lozovik Yu.E. Coupled exciton-photon Bose condensate in path integral formalism // *Physical Review B*. 2016. Vol. 93, P. 104530.
3. Elistratov A.A., Lozovik Yu.E. Polariton Bose condensate in an open system: Ab initio approach // *Physical Review B*. 2018. Vol. 97, P. 014525.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Впервые было получено представление функции Вигнера для канонического  $(N, V, T)$ -ансамбля в виде интеграла по траекториям.
- Впервые эффекты статистики Ферми удалось учесть с помощью парного псевдопотенциала в фазовом пространстве, реализующего принцип Паули. Это позволяет в ряде случаев избежать «фермионной проблемы знака» при расчёте термодинамических свойств вырожденных систем.
- Впервые для учёта эффектов статистики Бозе-Эйнштейна был предложен парный псевдопотенциал в фазовом пространстве, реализующий эффективное притяжение тождественных бозонов.
- Были разработаны новые квантовые методы Монте-Карло, позволяющие рассчитывать для неидеальных многочастичных систем фермионов средние значения произвольных квантовых операторов, парные корреляционные функции и функции распределения по импульсам.
- Проведён анализ влияния квантовых эффектов на функции распределения по импульсам протонов и электронов в сильнонеидеальной водородной плазме с умеренным вырождением.
- Впервые исследовано влияние квантовых эффектов на функции распределения по импульсам электронов и дырок в модели электрон-дырочной плазмы при изменении отношения отношения массы дырки к массе электрона.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- Полученное в работе представление функции Вигнера в виде интеграла по траекториям может быть полезным как для численного моделирования, так и для аналитического исследования функции Вигнера в квазиклассическом пределе и её асимптотического поведения.
- Предложенный в работе обменный псевдопотенциал позволяет в ряде случаев избежать «фермионной проблемы знака» и более эффективно исследовать сильнонеидеальные вырожденные фермионные системы.
- Учёт обменного взаимодействия бозонов и фермионов в виде псевдопотенциалов позволяет существенно сократить время расчёта по сравнению с известными методами (RPIMC, DPIMC, CPIMC, PB-PIMC) в условиях слабого и умеренного вырождения.
- В работе детально описаны численные методы SMPIMC, LAPIMC и NAPIMC, подбор технических параметров расчёта и влияние этих параметров на результат. Эта информация может быть полезной при проведении расчётов указанными методами, а также при усовершенствовании этих методов.
- В работе были рассчитаны энергия, давление и парные корреляционные функции в сильнонеидеальной водородной плазме при  $0.4 \leq \Gamma \leq 2.0$ ,  $0.3 \leq \chi_e \leq 5.0$ . Эти данные необходимы для построения уравнения состояния и изучения структуры водородной плазмы в указанной области состояний и могут быть использованы для проверки других независимых расчётов.
- В работе были исследованы равновесные функции распределения по импульсам в сильнонеидеальных двухкомпонентных кулоновских системах. Эти данные необходимы для расчёта пороговых энергий и констант скоростей реакций в плазменных средах, что необходимо при изучении процессов горения, детонации и ядерного синтеза при высоких давлениях.

Результаты диссертационного исследования могут быть рекомендованы для использования в следующих организациях: ИПХФ РАН, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, РФЯЦ-ВНИИТФ, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, СПбГУ, МФТИ.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- Теоретический формализм, лежащий в основе диссертационной работы, основывается на общих принципах квантовой механики и статистики и не содержит внутренних противоречий.
- Соответствие результатов тестовых расчётов формальных термодинамических свойств одночастичных систем с результатами численного решения исходных уравнений квантовой механики.
- Качественное и количественное согласие результатов расчёта энергии, давления и парных корреляционных функций в водородной плазме с результатами, полученными другими авторами.
- Качественное согласие результатов расчёта функций распределения по импульсам в водородной плазме с результатами, полученными другими авторами для слабонеидеальной плазмы методами теории возмущений.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в разработке формализма и численных методов, описанных в работе, а также в выполнении расчётов методами SMPIMC и NAPIMC и интерпретации полученных данных. Апробация результатов исследования проводилась на 12 российских и международных конференциях, в которых соискатель принимал личное участие. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены лично автором.

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

На заседании от 17.10.2018г. диссертационный совет принял решение присудить Ларкину А.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 31 человек, из них 10 докторов наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 22 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 22, 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.

17.10.2018г.

