

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

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 27 декабря 2023 г. (протокол № 21)

**Защита диссертации Светлова Антона Сергеевича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
«Коллоидные системы активных броуновских частиц в тлеющем разряде
постоянного тока»**

Специальность 1.3.9 – физика плазмы

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).
Протокол № 21 от 27 декабря 2023 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 26.01.2022 г. № 86/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 25 человек, из них 12 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), д.ф.-м.н., профессор Храпак А.Г.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), к.ф.-м.н. Тимофеев А.В.

1	Петров О.Ф.	Академик РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
2	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
3	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
4	Тимофеев А.В.	К.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14	Отсутствует
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9	Подключен
7	Беляев И.А.	К.т.н.	1.3.14	Присутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
9	Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
10	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Присутствует
11	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
12	Гавриков А.В.	Д.ф.-м.н., доцент	1.3.9	Присутствует
13	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
16	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
17	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Отсутствует
18	Зеленер Б.Б.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
19	Зобнин А.В.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
20	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
21	Киверин А.Д.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Присутствует
22	Лагарьков А.Н.	Академик РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
23	Левашов П.Р.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Присутствует
24	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
25	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
26	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
27	Пикуз С.А.	К.ф.-м.н.	1.3.9	Отсутствует
28	Савватимский А.И.	Д.т.н.	1.3.14	Подключен
29	Стегайлов В.В.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Отсутствует
30	Филиппов А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
31	Яньков Г.Г.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Отсутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации младшего научного сотрудника лаборатории 17.3 – активных кулоновских систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Светлова Антона Сергеевича** на тему «Коллоидные системы активных броуновских частиц в тлеющем разряде постоянного тока». Диссертация представлена впервые на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 17.3 – активных кулоновских систем ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, веб сайт: jihtr.ru).

Научный руководитель:

Петров Олег Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН; Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, веб сайт: jihtr.ru).

Официальные оппоненты:

Карасев Виктор Юрьевич – гражданин РФ, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры Общей Физики I Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ; Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9, веб сайт: spbu.ru).

Голубев Сергей Владимирович – гражданин РФ, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник отдела физики плазмы (120) Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46, сайт: <https://ipfran.ru>)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского Отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН; Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1, веб сайт: www.itp.nsc.ru).

На заседании присутствуют официальный оппонент д.ф.-м.н., доцент Карасев В.Ю. и, научный руководитель Светлова А.С. д.ф.-м.н., профессор, академик РАН Петров О.Ф. По видеосвязи подключился официальный оппонент д.ф.-м.н., профессор Голубев С.В.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Дорогие коллеги! Начинаем заседание диссертационного совета, и мы сейчас должны заслушать сообщение и диссертацию Светлова Антона Сергеевича «Коллоидные системы активных броуновских частиц в тлеющем разряде постоянного тока». И первым шагом, я думаю, будет предоставление слова Алексею Владимировичу для сообщения данных диссертанта.

Ученый секретарь

Информирует членов совета об особенностях работы в смешанном очно-дистанционном формате, зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о

соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

Председатель

Судя по всему, вопросов пока нет. Сейчас, Антон Сергеевич, вам предоставляется возможность изложить основные моменты своей работы, пожалуйста.

Светлов Антон Сергеевич

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

Председатель

Спасибо, Антон Сергеевич. Есть ли вопросы у присутствующих в зале? Пожалуйста.

Зобнин Андрей Вячеславович

Вы несколько раз сказали, что цепочка деградировала, осталось шесть частиц. А куда отделились остальные? Они на стенки ушли, выпали куда-то или испарились. Можете прокомментировать пожалуйста?

Светлов Антон Сергеевич

Спасибо большое за ваш вопрос. В силу того, что частицы обладали высокой кинетической энергией, они покидали страту и падали вниз трубки, и уже не могли никак вернуться в ловушку.

Председатель

Есть ли ещё вопросы? Пожалуйста.

Василяк Леонид Михайлович

Скажите пожалуйста, на цепочку вы действуете лазером, в результате определённые частицы уходят, другие опускаются и поднимаются. Поскольку, как известно, такие структуры всегда висят в градиенте электрического поля, те частицы, которые поднимаются или опускаются, т.е. они начинают смещаться, там меняется температура и меняется заряд. Не может ли быть механизма передачи энергии не только от лазера, а наоборот вы берёте энергию от электрического поля разряда, а лазер только толкает вад-вперёд?

Светлов Антон Сергеевич

Спасибо же за ваш вопрос. Дело в том, что энергия, которая передаётся электрическим полем, по сравнению с энергией, которая передаёт лазерное излучение довольно мала, чтобы так сильно воздействовать, чтобы было активное броуновское движение. А также важный момент – у нас не всегда частицы смещаются ниже или выше. То есть возможны ситуации, когда у нас частица покидает своё место в структуре, а на её место другая частица не приходит, то есть там остаётся просто свободное пространство.

Председатель

Кто ещё хотел бы задать вопрос? Пожалуйста, Алексей Владимирович.

Тимофеев Алексей Владимирович

Антон Сергеевич, а можно вернуться на слайд с поведением цепочек при разных мощностях, там, где у вас медные и где янус-частицы? Вы светите на все частицы сразу, да?

Светлов Антон Сергеевич

Да, на все

Тимофеев Алексей Владимирович

Как вы объясняете разное поведение частиц, как для медных, так и для янус-частиц? Ведь по вашему механизму вроде бы влияние должно быть одинаковое на все частицы, а поведение разное.

Светлов Антон Сергеевич

Дело в том, что всё-таки частицы покрыты немного по-разному. Мы не можем добиться того, чтобы покрытие было у всех, например, идеально 50%, то есть у кого-то 49,5%, у кого-то 51% от этого у нас происходит сепарация и по массе, и естественно, поглощающие способности меняются, и таким образом, собственно, и получается, что у нас каждая частица по-разному может реагировать на лазерное воздействие.

Тимофеев Алексей Владимирович

С янус-частицами понятно, а вопрос про медные ещё?

Светлов Антон Сергеевич

Да, медные частицы, хоть они изготавливаются на специальных устройствах, всё равно где-то толщина покрытия больше, где-то толщина покрытия меньше, и масса у них всё равно будет отличаться. Конечно, не на большой процент, но всё равно будет сепарация по массе.

Тимофеев Алексей Владимирович

Понятно.

Председатель

Михаил Николаевич, пожалуйста.

Васильев Михаил Николаевич

Мой вопрос в значительной мере повторит предыдущий, но, тем не менее, хотелось бы уточнить кое-какие детали. Во всех ваших графиках, выводах, в рассуждениях, везде приводится мощность лазера. А можно ли что-нибудь сказать по поводу энергии, поглощённой частицами? Это ведь, согласитесь, не одно и то же. И вот когда звучал ответ на вопрос о влиянии электрического поля, вы сказали, что влияние поля маленькое по сравнению с лазерным воздействием и так далее. Хотелось бы какие-то количественные оценки услышать. Вот сколько энергии поглощает частица?

Светлов Антон Сергеевич

Сколько энергии поглощает частица, я сейчас вам точную число, цифру ответить не смогу. Могу сказать следующее, что у нас графики представлены в зависимости от плотности мощности, но даже если мы заменим нашу ось на значения, насколько у нас поглощает каждая частица, то мы всё равно получим ту же картину. То есть у нас, может быть, изменится количественная составляющая, но качественно мы будем видеть и наблюдать то

же самое. То есть для наглядности не думаю, что это сильно повлияет. А так, конечно, у нас каждая частица по-разному поглощает.

Председатель

Есть ли ещё вопросы? Лев Гаврилович, пожалуйста.

Дьячков Лев Гаврилович

Когда вы говорите о янус-частицах, может быть даже здесь дело не в их «янусности», что у них не полностью покрыта поверхность. То есть у тех частиц, с которыми вы работаете, сколько примерно процентов покрытие, без покрытия и с покрытием?

Светлов Антон Сергеевич

У нас янус-частицы в среднем это 25-30% покрытия. Вот я на слайд вывел рисунок «В».

Область, которая модифицирована выделена красным, то есть это и есть покрытие.

Дьячков Лев Гаврилович

Но это покрытие у вас именно компактное, в одном месте? Или же бывает, что оно разбросано частично?

Светлов Антон Сергеевич

Нет, у нас именно в одном месте, то есть с какой-либо стороны 25-30%.

Дьячков Лев Гаврилович

Именно так?

Светлов Антон Сергеевич

Да

Дьячков Лев Гаврилович

Можно ли это вообще проследить, когда вы наблюдаете, например, цепочки, с какой стороны обработанная поверхность частиц находится?

Светлов Антон Сергеевич

Каждый раз разная сторона. У нас частицы имеют собственное вращение, то есть они постоянно еще и вращаются.

Дьячков Лев Гаврилович

А, ладно, тогда ось вращения, как направлена относительно этой обработанной поверхности? Она через нее проходит или это может быть по-разному?

Светлов Антон Сергеевич

Это может быть по-разному.

Дьячков Лев Гаврилович

По-разному, да? Ясно. Спасибо.

Светлов Антон Сергеевич

Вам спасибо.

Председатель

Еще кто-нибудь хотел бы задать вопрос? Если нет, то я тоже хочу задать вопрос такого типа. Когда говорят о прикладном значении исследований системы броуновских активных частиц в коллоидах, то упоминаются обычно, прежде всего, медицинские исследования. А вот какое прикладное значение, на ваш взгляд, имеют исследования тех же систем, как у вас в работе, в пылевой плазме? Прикладное значение есть или пока еще оно не известно?

Светлов Антон Сергеевич

Конечно же, есть. И оно на самом деле коррелируется с коллоидами. Самое важное, что мы показываем еще одну ситуацию, в которой у нас такое возможно, и что есть еще способы получения активного броуновского движения вот таким способом в таких системах. То есть доставка лекарств, это не обязательно только через коллоиды исследовать можно и фундаментальные вопросы об этом изучать.

Председатель

Хорошо, спасибо. Видимо, больше вопросов нет. Тогда мы перейдем к следующему пункту нашей программы. И слово предоставляется научному руководителю, доктору физико-математических наук, профессору, академику Петрову Олегу Федоровичу.

Петров Олег Федорович

Спасибо. Уважаемые коллеги, я должен и буду говорить о самом соискателе, не о его работе. Антон Сергеевич вышел в институт в ОИВТ РАН через аспирантуру физтеха, куда он поступил после окончания МГТУ. И сейчас он представляет работу по завершению аспирантуры. Здесь следует сказать, что у него такая траектория его собственная, она не была прямолинейной. Когда он пришел, перед ним была задача вначале поставлена и сформулирована, она касалась активных частиц в коллоидах, это задача в области уже теплофизики и соответствует его специальности. Но в процессе постановки работы и экспериментов все-таки выяснилось, что целесообразно вернуться. Это для нас может быть, для него это движение в сторону развития и вперед к частицам в газовых разрядах. И здесь разряд постоянного тока, он имел исторические свои особенности, связанные с тем, что первые работы в ОИВТ РАН были поставлены в области пылевой, сильно неидеальной плазмы, плазменных кристаллов как раз в разряде постоянного тока. Задача тогда была получить существенно трехмерные структуры, поскольку первые эксперименты, наблюдаемые в ряде групп, они касались монослоя. Это условно двумерная структура, когда говорится о двухмерности или трехмерности идет соотношение размеров. Двумерная предполагает, что один размер существенно превосходит другой. Сейчас вся история с активными броуновскими частицами находится в состоянии бума. Это начало было положено в 90-х годах и сейчас идет в первую очередь, потому что активные частицы захватили коллоидное сообщество. Оно напрямую связано с разными родами приложениями. В результате идет мощная тенденция роста работ. Здесь, почему именно эта постановка задачи, в которую Антон Сергеевич включился, оказалась важной. Те работы, которые он представлял и в которых он двигался, это работы с системами в английском языке «far from equilibrio». Попросту говоря, это системы вдали от равновесия, но стационарные системы. Задачи, которые здесь ставились, Антон Сергеевич с ними очень хорошо разобрался, в первую очередь экспериментальными наблюдениями, это задачи наблюдения эволюции такой системы. Эволюция понимается как развитие. Здесь продемонстрировано, что есть драйвер этой эволюции. Излучение позволяет эту систему двигать в сторону нарастания сложности, а это возможно тогда, когда система вдали от

равновесия и энтропия в ней падает. Найти такой объект, который можно ставить в точные эксперименты довольно сложно и возникает масса разных факторов, которые усложняют. А здесь это все видно в таком первозданном виде. Усложнение проявляется через сложность траектории. Здесь было показано, что есть действительно механизм преобразования энергии в энергии кинетического движения. Это одновременно означает, что есть механизм уменьшения энтропии такой системы, и есть эффект, связанный с усложнением траектории. Эта работа больше имеет отношение к неким фундаментальным, в том числе к термодинамике, которую наш соотечественник Илья Пригожин разрабатывал. Это термодинамическая система вдали от равновесия. Антон Сергеевич не только овладел техникой экспериментов и поставил здесь очень точные эксперименты, но он сам эволюционировал. Эволюционировал опять-таки по эволюции здесь переход сложности. Я не могу здесь не упомянуть систему физтеха, которая является как раз драйвером такой эволюции. У меня уже не один пример, когда человек, приходящий в аспирантуру, магистратуру, через некоторое время, в начале, может быть, некий период идет адаптационного характера, затем мы наблюдаем безусловный прогресс роста его квалификации. У Антона Сергеевича так и получилось. Основные результаты нескольких переходов с коллоидной системы в плазму пришлось уже в последние годы аспирантуры. Но он за этой задачей справился. Эти результаты ему удалось получить. И эти результаты получены впервые. Все, что касается разряда, а вот в обзорах к коллоидам там уделяется особое внимание, когда движение носит двумерный характер или трехмерный. Таких работ сравнительно немного. Здесь такие приоритеты были им получены. И он, конечно, набрал за эти годы необходимую квалификацию. В моем представлении он сейчас в состоянии претендовать на искомую степень. Спасибо.

Председатель

Спасибо, Олег Федорович. Теперь я хочу попросить Алексея Владимировича огласить заключение организации, где была выполнена диссертация, то есть ОИВТ РАН, отзыв ведущей организации Института теплофизики Сибирского отделения РАН и другие отзывы, которые поступили на сегодняшний день в совет.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, начну с заключения **Объединенного института высоких температур (ОИВТ РАН)**, где была выполнена диссертация. Если позволите, пропущу подробное описание работы. Ее достоверности и личного вклада автора, так как мы недавно заслушали работу. И в дальнейших отзывах, если позволите, тоже буду пропускать. Если потребуется, зачитаю подробнее. Заключение подписано председателем семинара, заместителем директора (ОИВТ РАН), доктором физ.-мат. наук Михаилом Михайловичем Васильевым и секретарем семинара, кандидатом физ.-мат. наук, заведующим лаборатории №17.2. – диагностики пылевой плазмы Лисиным Евгением Александровичем. Утверждено зам. Директора (ОИВТ РАН), доктором физ.-мат. наук Андреем Владимировичем Гавриковым. В заключении достаточно подробно описана научная новизна, цель, актуальность, публикации, положения, достоверность результатов и так далее, и дано следующее заключение: рекомендовать к защите на диссертационном совете – на нашем диссертационном совете – на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Кроме того, в личном деле есть отзыв **ведущей организации**. Это **Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН (ИТ СО РАН)**. Отзыв оставлен главным научным сотрудником лаборатории разреженных газов Института теплофизики

им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, доктором физико-математических наук Геннадием Ивановичем Сухининым и утвержден ученым секретарем ИТ СО РАН Макаровым Максимом Сергеевичем.

Отзыв положительный, есть замечания:

1. В тексте диссертации присутствует значительное число опечаток, грамматических ошибок, жаргонизмов и повторов.
2. Литературный обзор, представленный в Главе 1, занимает достаточно много места (35 страниц из общего количества 110 страниц), однако, большая часть обзора посвящена описанию исследований активных броуновских частиц в различных областях науки, в то время как упоминанию работ других авторов, посвященных исследованию активного броуновского движения частиц в низкотемпературной плазме газовых разрядов, уделено меньшее внимание.
3. В диссертации приведены результаты экспериментального исследования динамики активных броуновских частиц, как уединенных, так и кластеров, практически при одних и тех же условиях (ток и напряжение разряда, давление буферного газа, размеры частиц, число частиц в кластере). Варьирование данных параметров (в частности, размера частиц и числа частиц) помогло бы более детально разобраться с природой наблюдаемого явления.
4. В третьей главе на графике зависимости кинетической энергии от мощности лазера для покрытых медью пылевых частиц и янус-частиц имеется «скачок», который на этой же странице называется «прыжок». Является ли этот скачок воспроизводимым явлением, а не ошибкой измерений? Как он изменится при других параметрах эксперимента?
5. В диссертации не приведены количественные данные о величинах поглощения лазерного излучения использованных в работе частиц. Известно, что покрытия из чистых металлов (медь, серебро, золото, платина и др.), хорошо отражают, а окислы металлов (например, CuO), наоборот, поглощают излучение в оптическом диапазоне. Не может ли медное покрытие частиц из меламин-формальдегида, используемых в работе, окислиться в процессе подготовки экспериментов?
6. В диссертации недостаточно обосновано использование динамической энтропии для анализа процесса самоорганизации частиц пылевой плазмы.
7. Следует отметить недостаток сравнения полученных результатов с результатами других авторов, как на количественном, так и на качественном уровне.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы. Диссертация 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. (ред. 07.06.2021 г.), а ее автор Светлов Антон Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 -физика плазмы.

Кроме того, было получено 3 отзыва на автореферат. Все отзывы положительные. Если позволите, я буду отмечать только замечания. А описания диссертации и о том, что в соответствии с п.3.9 положения и о мнении о том, что Антон Сергеевич заслуживает присуждение буду пропускать, так как они совпадают во всех отзывах.

(Первый отзыв). Итак, первый отзыв получен из **Федерального государственное бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский**

государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» от заведующего кафедрой теплофизики и ядерной энергетики доктора физико-математических наук, доцента Чиркова Алексея Юрьевича. – отзыв положительный, с замечаниями:

- На стр. 20-21 в тексте описано поведение динамической энтропии. Эти результаты выглядели бы значительно ярче в сопровождении графической иллюстрации. В частности, интересно различие в характере поведения динамической энтропии до и после перехода в режим «в ловушке».

- На стр. 21 отмечается, что нелинейность зависимости активности янус-частиц от интенсивности лазерного излучения может указывать на динамический фазовый переход (переход броуновского движения из баллистического режима в диффузионный). Видимо, данное утверждение соответствует графикам на рис. 4.5, но, к сожалению, пояснения в тексте даны очень кратко.

(Второй отзыв). Следующий отзыв получен из **Государственного научного учреждения «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»** от ведущего научного сотрудника центра «Физика плазмы» кандидата физико-математических наук Филатовой Ирины Ивановны. – отзыв положительный, с замечанием:

- по материалам автореферата диссертации можно отметить наличие в тексте некоторых неточностей и описок, нечеткие и слишком мелкие, трудно читаемые числовые значения и надписи на некоторых рисунках, что не влияет на содержание работы в целом и не снижает ее достоинств.

(Третий отзыв). Следующий отзыв на автореферат получен из **Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)** от заведующего лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах, доктора физико-математических наук, профессора Попеля Сергея Игоревича. - отзыв положительный, без замечаний.

Председатель

Антон Сергеевич, сейчас вы имеете возможность ответить на замечания из письменных отзывов.

Светлов Антон Сергеевич

Да, спасибо большое. Начнем с замечаний отзывов от ведущей организации ИТ СО РАН имени Кутателадзе. Заранее скажу, что есть отзывы, с которыми я по умолчанию согласен, и отзывы, которые хотелось бы прокомментировать. Собственно, на данном слайде представлены отзывы, которые я хотел бы прокомментировать. Было замечание, что в графике кинетической энергии, в зависимости от мощности лазера для покрытых медью и янус-частиц имеется так называемый скачок. Вопрос является ли этот скачок воспроизводимым явлением, а не ошибкой измерений, и как он изменится при других параметрах эксперимента. Здесь важно понимать, что скачок является все-таки воспроизводимым явлением. Мы наблюдали его в экспериментах, и с кластерами, и в других сериях экспериментов, проводимых при таких же и при других параметрах плазмы. Важный момент, что, конечно же, он будет меняться в зависимости от параметров эксперимента, то есть в зависимости от того, какие частицы мы используем, какие параметры разрядной плазмы будут. Также у нас будет изменяться значение и где будет положение этого так называемого скачка.

Также замечание было по вопросу о поглощении. У нас медное покрытие используется. И вопрос следующий, не может ли медное покрытие окислиться в процессе подготовки. Да, действительно, у нас в процессе подготовки эксперимента медь окисляется, как только она взаимодействует с кислородом. Поэтому целесообразнее будет говорить о том, что у нас поглощение происходит не только самой медью, но и ее оксидами. Отзывы на автореферат, я с ними полностью согласен. Спасибо.

Председатель

Спасибо. Теперь слово предоставляется официальному оппоненту, доктору физико-математических наук, профессору Карасеву Виктору Юрьевичу из Санкт-Петербургского университета.

Карасев Виктор Юрьевич

Благодарю. Уважаемые коллеги, это уже третья работа, которую я рецензирую на тематику, очень интересную, с активными частицами. В общем, я ее хотел бы выделить и в деталях скажу. Есть развитие существенное и по количеству, и по качеству, по размерности постановки задач и результатов. Пылевая плазма с активными частицами и ее фундаментальное исследование, конечно, это основы, и, конечно, в этом ее актуальность. Данная работа еще более высокая, потому что переход есть к трехмерному случаю, когда создаются в пылевой плазме активные частицы. В принципе, это надо выделить. Вообще я кратко подчеркну, что мне нравится в работе или какие-то позитивные по ее описанию моменты, сильные стороны работы. Это исследование объемной пылевой структуры. Здесь, конечно, новизна работы. В общем, первые результаты, которые выводятся из плоскости развития. Здесь, в общем-то, все и методы описания, и здесь развиваемая динамическая энтропия, и кинетика, и все остальное. Ну, второе, это анизотропные условия. Допустим, даже в единственной цепочке, которую с счетного числа частиц создавали, не были подобраны условия, когда можно было долго сохранить одинаковое число частиц. В любом случае, здесь анизотропная среда, и это интересная работа с точки зрения результатов, которые будут ещё. Следующее, регистрация скачка или, как там говорили, прыжка кинетической энергии у всех покрытых частиц. Обсуждалось уже и не буду детализировать. Ну, и четвертый момент. Немонотонность энергетики янус-частицы. В области 0,1-0,4 ватт на сантиметр квадратный, цветной график. Дополнительно хочу отметить хороший стиль изложения. Вообще и такой толковый, структурированный литературный обзор. Я уже говорил, что это не первая работа и не первые статьи, которые я рецензировал и сталкивался. Здесь надо было бы про эту классификацию сказать, что сделано больше, чем просто перечисления. Кроме того, с точки зрения эксперимента я бы хотел выделить во второй главе описанную диагностику, когда авторы сравнили двухмерную и трехмерную диагностику и не делали лишней работы, остановились на двухмерном подходе, поскольку параметры оказались чувствительными для более простой, удобной двухмерной диагностики, настолько же, насколько и трехмерной диагностики. Из-за того, что литературный обзор хороший, хочется задавать вопросы, связанные с общим представлением о физике и с тем, что в работе сделано. **Первый мой вопрос.** – это про вращательное движение активных частиц и вообще про определение. Прослеживаются два подхода, что такое активные частицы, в пылевой плазме, в частности, это когда преобразование энергии в поступательное движение и когда энергия становится больше, отрывается от тепловой устойчивости. В работе, вероятно, впервые приведен глубокий обзор проблемы, хочется спросить у автора, является ли собственное вращение частиц каким-то видом активного движения частиц, или только интерес для активных частиц

ограничивается преобразованием энергии в поступательное движение. Из того, что говорил претендент в речи, наблюдалось ли в эксперименте мерцание частиц на регистрируемых траекториях частиц, в частности у янус-частиц это должно быть, и оно тоже может иметь увеличение по частоте, по скорости вращения. **Второй вопрос.** - Сопоставляя рисунки 3.2 и 3.3, там есть масштаб пространственной неоднородности движения для отдельных частиц. Для медных частиц при мощности лазера 0,9 ватт на сантиметр квадратный это примерно 4 на 4 миллиметра по вертикали и по горизонтали. И кажется, что траектория тут говорит об изотропности. В то время как в главе 4 рисунки примерно при той же энергии, где я смог разглядеть смещение 6 миллиметров горизонтальной плоскости и только четыре в вертикальной. Насколько я понимаю, в цепочках возникает анизотропия смещения. И это не только результат того, что у нас анизотропные свойства частиц, еще и анизотропная ловушка, возможно. Что можно сказать по этому поводу про анизотропию, которая в трехмерном случае может проявляться. И **третий вопрос** расширение предыдущего. Хочется, чтобы автор детализировал сравнение энергетик отдельных частиц и частиц в цепочках. Например, на рисунке 3.5 и 4.6. Эксперименты выполнены примерно при одинаковой мощности. И сопоставление для медных частиц, по крайней мере у которых цепочки не разрушаются, было бы интересно сделать. На мой взгляд, 40 электрон-вольт для частиц в цепочке и всего лишь 10 электрон-вольт для одиночной частицы. Это в общем так или как-то вы прокомментируете по-своему?

Также скажу, что обсуждаемая работа высокого уровня, она высокого уровня по методам, по оборудованию, по полученному новому набору эффектов. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Но вообще, конечно, из недостатков еще работы не только печатки, но это еще и перевод с английского. Вот, допустим, 66-я страница. Опечатки в материале частиц в ряде мест, например, в «объеме нижнего слоя тлеющего разряда». Как надо понимать, наверное, в страте, дальше «в полосах разряда постоянного тока» Ну, наверное, полосы – это слои, да, это страты. Вот такой перевод, наверное, на русский язык все-таки должен быть адаптирован. Но в заключение хочу сказать, что сделанные замечания никаким образом не портят позитивной картины и полученных результатов уровня работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Она соответствует всем критериям п. 9 положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., ее автор Светлов Антон Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 -физика плазмы.

Председатель

Спасибо, Виктор Юрьевич. Антон Сергеевич, теперь вы можете ответить на замечания Виктора Юрьевича.

Светлов Антон Сергеевич

Да, спасибо большое. Очень ценные замечания. Замечания про вращательное движение частиц. Вопрос был, наблюдалось ли мерцание частиц при регистрации траектории, в частности, у янус-частиц. Да, мерцание частиц наблюдалось. Это как раз связано с анизотропией свойств. У нас одна часть поверхности покрыта, другая нет. В силу этого у нас, конечно же, отражается по-разному. То есть одна часть поверхности поглощает больше, другая меньше, поэтому наблюдается мерцание. Также вопрос про преобразование в поступательную энергию. У нас собственное вращение все-таки влияет, конечно же, и на поступательное движение. Говоря про активное броуновское движение, это, конечно, говорится о том, что преобразование именно в поступательное движение. Но здесь

вращательное движение и поступательное между собой связано. То есть, естественно, когда у нас есть вращение, оно влияет и на поступательное движение.

Также замечание про траектории движения частиц, про анизотропию смещения. Я бы ответил на этот вопрос так, что, да, у нас действительно не изотропные смещения. Это стоит побольше поисследовать. Но здесь важно еще понимать то, что представленные траектории, они за одну секунду, и интервал, который выбран, он, собственно, может демонстрировать разную картину и судить об изотропии, анизотропии смещения. Об изотропии сложно, по анизотропии точно видно, что она есть. Также в цепочных структурах был вопрос, наблюдаются ли, да, также наблюдаются похожие эффекты анизотропии смещения.

Также был вопрос про энергетику частиц. Что у нас, вроде, эксперименты выполнены при одинаковых параметрах и для цепочек, и для одиночных частиц. Можно ли вообще как-то сравнить или интерпретировать, почему у нас для цепочек 40 электрон-вольт, для одиночной частицы 10 электрон-вольт. Важно учитывать, что график, который представлен для цепочных структур, он все-таки усреднен еще и по ансамблю. И действительно у нас во всем ансамбле частиц будут и частицы, у которых будет и 10 электрон-вольт, как и у одиночной частицы, и будут и с более высокой энергией. В среднем величина получилась больше. Насколько можно здесь сравнивать, тоже не могу до конца ответить, потому что все-таки лазерное воздействие было двумя разными лазерами реализовано твердотельным и газоразрядным аргоновым, хоть и при одной плотности мощности, но все равно у нас длина волны была разной. То есть и поглощение, соответственно, происходит все равно немножко по-разному. И, собственно, наверное, все. Спасибо.

Председатель

Спасибо. Теперь слово предоставляется официальному оппоненту, доктору физмат наук, профессору Сергею Владимировичу Голубеву из Института прикладной физики. Пожалуйста.

Голубев Сергей Владимирович

Здравствуйте. Можно говорить?

Председатель

Здравствуйте/ Да, Сергей Владимирович, пожалуйста.

Голубев Сергей Владимирович

Меня слышно?

Председатель

Слышно.

Голубев Сергей Владимирович

Я должен отметить, прежде всего, что это первая моя работа по этой тематике, которую я рецензирую. Могу сразу сказать, что она мне понравилась. Я ее внимательно прочитал. И имел возможность поговорить с Антоном Сергеевичем лично. Он приезжал к нам в институт, сделал достаточно успешный семинар, на котором тоже была большая дискуссия. Несколько слов о том, что мне понравилось. Во-первых, это диагностика. Вроде бы естественная диагностика, но она позволяет трехмерное движение этих частичек

исследовать достаточно полно и это впечатляет. Второе, если я правильно понял, даже получение цепочечных структур, это тоже какое-то искусство экспериментатора. Они не так просто получаются. Нужно подобрать массу вариантов, чтобы они были, а потом еще и лазером воздействовать. Третья особенность, которая мне придала впечатление, это то, что янус-частицы они сами делают. То есть можно и контролировать какие-то покрытия, и менять их, и так далее. В этом смысле, с точки зрения экспериментальной техники, это впечатляет.

Теперь, собственно говоря, некоторые замечания. Видимо, потому что это первая моя работа на этот счет. **Первый вопрос**, который возникает, это то, как под действием этой самой радиометрической силы, связанной с поглощением на поверхности частичек, получается многомерное движение. Ведь действительно, если мы греем частички лазером, они вращаются. При таком подходе силы, действующие на частички направлены вдоль распространения излучения. И непонятно, почему частички, под действием каких сил, начинают возвращаться, начинают колебаться. Это естественный вопрос. И мне кажется, в диссертации можно было бы обсудить, какие силы заставляют болтаться частички в нашей ловушке. **Второе замечание**. В диссертации декларируется частичка удерживается трехмерной ловушки тлеющего разряда постоянного тока. Однако физика этого образования этой ловушки в диссертации не обсуждена. Более того, мне кажется, это важно было бы обсудить. Тем более, что в экспериментах есть возможность не только измерить параметры этого потенциала, который есть в тлеющем разряде, например, зондами. А это было бы важно для того, чтобы проследить влияние, характерный масштаб потенциала на движение частичек. Но можно и менять этот профиль электростатического потенциала, например, изменяя размер капролоновой вставки. Или измерять потенциал можно за счёт изменения газа. Температура электрона сменяется, соответственно, и потенциалы могут тоже измениться. При введении таких экспериментов было бы интересно, поскольку они могут влиять на изменения на характер движения частичек. **Третье замечание**. И в введении в диссертации, и в постановке задачи настойчиво проводится мысль о том, что движение разных активных частичек имеет похожую динамику. Сравнение различного движением частичек в плазме позволит описывать динамику и других открытых неравновесных систем. В этой связи в диссертации было бы уместно привести примеры, в которых полученные в работе данные помогли бы ответить на вопросы в смежных областях. Это явно украсило бы диссертацию. У меня только три замечания существенных, остальные мы обсудили в личных встречах. В заключении, могу сказать, что все приведённые замечания не влияют на очень положительную оценку работы. Диссертация выполнена на высоком уровне, содержит решение сложных экспериментальных задач и само по себе изучение активного броуновского движения представляется актуальной и интересной. В целом, диссертация представляет собой законченную научно квалификационную работу в соответствии со всем критериями. Антон Сергеевич заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук. Спасибо за внимание.

Председатель

Спасибо, Сергей Владимирович. Антон Сергеевич, у вас есть возможность ответить на замечания.

Светлов Антон Сергеевич

Спасибо, Сергей Владимирович, за ваши замечания. Говоря **о первом**, вопрос был про силу. В результате воздействия каких сил у нас происходит движение, например, по направлению

или против направления лазерного излучения? Вообще какие силы еще влияют? Здесь важно учитывать, что частица находится в ловушке, и конечно, на нее действуют электрические силы. В первую очередь, они устремляют сами частицы назад к центру ловушки. Второй момент – радиометрическая сила. Она, как я уже говорил про механизм, флуктуирует и по величине, и по направлению, что в свою очередь тоже может приводить к тому, что она может двигаться в различных направлениях и по направлению лазера, и против направления лазера, и, собственно, в любом направлении. Это кратко по данному замечанию, а с другими двумя замечаниями я полностью согласен. Спасибо вам большое за них. Да, действительно стоит провести эксперименты с различными, например, сортами газа и посмотреть, как у нас будут изменяться параметры движения. И также возможно больше привести результатов в смежных областях и какие вещи у нас происходят в подобной ситуации. Спасибо.

Председатель

Есть время для дискуссии. Кто хотел бы выступить? Пожалуйста, Михаил Михайлович.

Васильев Михаил Михайлович

Дорогие коллеги, Антон Сергеевич пришел в нашу лабораторию около четырех лет назад, и его траектория несколько отличалась от классической траектории. Олег Федорович уже по этому поводу сказал. То есть этот классический путь, когда студенты физтеха приходят на третьем курсе и погружаются в работу и в тематику, набирают некий опыт работы над бакалаврской диссертацией, потом следом идет магистерская диссертация. Вот этот долгий классический путь, у Антона Сергеевича был несколько другой, более напряженный и тяжелый. Он пришел из МГТУ, как нам Алексей Владимирович рассказал, и занимался он совершенно другими задачами, связанными с ядерной физикой. И на самом деле те публикации, которые были показаны нам в докладе, это не единственные публикации Антона Сергеевича. У него есть и статьи по ядерной физике. Но оказавшись в нашей лаборатории, он достаточно интенсивно и ответственно взялся за экспериментальную работу. Мы эту работу сегодня заслушали. И, на мой взгляд, он показал квалификацию достаточную для присуждения ему степени. Я буду голосовать «за», и призываю вас сделать так же. Спасибо.

Председатель

Кто еще хотел бы выступить? Ну, если все ясно и без дискуссий, я думаю, мы можем переходить к следующему вопросу. Сейчас слово предоставляется соискателю для заключительных слов.

Светлов Антон Сергеевич

Большое всем присутствующим и в зале, и дистанционно. Спасибо большое диссертационному совету за возможность представить свою работу. Спасибо моему научному руководителю Олегу Федоровичу за то, что направлял меня в работе на всем моем сложном пути. Отдельное спасибо хочется сказать Васильеву Михаилу Михайловичу за помощь и поддержку во всех сложных ситуациях. Спасибо всем большое.

Председатель

Теперь мы можем перейти к голосованию, и как обычно, Алексей Владимирович напомнит вам, как это делается.

Ученый секретарь

Коллеги, наше заседание проводится в комбинированном очном и дистанционном режиме. Соответственно, голосование проводится с использованием телекоммуникационных систем, то есть на сайте нашего института. Прошу всех присутствующих, очно и дистанционно, членов диссертационного совета войти под своим логином и паролем на сайт института и проголосовать. Можно воспользоваться своим устройством или компьютером на сцене.

(Проводится процедура голосования).

Председатель

Пока подсчитываются голоса, мы можем обсудить ситуацию с проектом заключения.

(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).

Председатель

Подсчет голосов закончился, Алексей Владимирович сейчас объявит результаты.

Ученый секретарь

На заседании присутствовало 25 членов диссертационного совета, очно присутствовало 18 членов диссертационного совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации 12, онлайн присутствовало 7, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации 2. Получено 25 голосов, 24 «за», 1 «испорченный бюллетень», 0 «против».

Председатель

Давайте проголосуем за утверждение результатов голосования. Есть воздержавшиеся? Кто против? Единогласно принимается.

(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно).

Председатель

Уже внесены поправки в окончательный текст решения совета, давайте проголосуем за его утверждение.

Кто против? Кто воздержался? Мы проголосовали единогласно.

(Проект заключения принят единогласно).

Поздравляю всех с наступающим Новым годом, желаю счастья, здоровья и мира.

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

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.12.2023г. № 21

О присуждении Светлову Антону Сергеевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Коллоидные системы активных броуновских частиц в тлеющем разряде постоянного тока» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 26.10.2023 г., (протокол заседания № 14) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации РФ от 26.01.2022г. № 86/нк.

Соискатель Светлов Антон Сергеевич 1995 года рождения, в 2019 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории № 17.3. – активных кулоновских систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2023 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Диссертация выполнена в лаборатории №17.3. – активных кулоновских систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор, академик, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Петров Олег Федорович.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры Общей Физики I Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Карасев Виктор Юрьевич;

- доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела физики плазмы (120) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» Голубев Сергей Владимирович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского Отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) в своем положительном заключении, составленном главным научным сотрудником лаборатории разреженных газов, доктором физико-математических наук Геннадием Ивановичем Сухининым (утвержденном 11.12.2023г. директором академиком Марковичем Д.М.) указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов практически по всем направлениям работы. Например, к ним относятся результаты, связанные с экспериментальным исследованием активного броуновского движения

одиноким частиц с различными свойствами поверхности (с поглощением лазерного излучения и без), левитирующих в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения. Также представляет интерес экспериментальное изучение активного броуновского движения частиц в цепочечных структурах и исследование их динамики при воздействии лазерного излучения различной мощности в плазме тлеющего разряда постоянного тока.

Результаты работы могут быть полезны для исследователей из Института теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе, Объединенного института высоких температур РАН, Института общей физики им. А.М. Прохорова, МГУ им. М.В. Ломоносова, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Московского физико-технического института и других научных организаций, проводящих исследования в области физики пылевой плазмы.

Соискатель имеет 6 опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях, в том числе по теме диссертации опубликовано 3 работы и 12 тезисов в сборниках трудов конференций:

1. Svetlov A.S., Vasiliev, M.M., Kononov, E.A., Petrov, O.F., Trukhachev, F.M. 3D Active Brownian Motion of Single Dust Particles Induced by a Laser in a DC Glow Discharge. *Molecules* 2023, 28, 1790.
2. Светлов А.С., Васильев М.М., Голятина Р.И., Майоров С.А., Петров О.Ф., Активное броуновское движение микрочастиц в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии лазерного излучения. *Прикладная физика*, 2023, № 5, с. 53-60.
3. Светлов А.С., Кононов Е.А., Трухачев Ф.М., Васильев М.М., Петров О.Ф., Активное броуновское движение пылевых частиц в квазиодномерных (цепочечных) структурах в тлеющем разряде. *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*, 2023, том 164, вып. 5, с. 715-721.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (зав. кафедрой теплофизики и ядерной энергетики д.ф.-м.н., доцент Чирков А.Ю.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- На стр. 20-21 в тексте описано поведение динамической энтропии. Эти результаты выглядели бы значительно ярче в сопровождении графической иллюстрации. В частности, интересно различие в характере поведения динамической энтропии до и после перехода в режим «в ловушке».

- На стр. 21 отмечается, что нелинейность зависимости активности янус-частиц от интенсивности лазерного излучения может указывать на динамический фазовый переход (переход броуновского движения из баллистического режима в диффузионный). Видимо, данное утверждение соответствует графикам на рис. 4.5, но, к сожалению, пояснения в тексте даны очень кратко.

2. Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» (ведущий научный сотрудник центра «Физика плазмы» к.ф.-м.н., Филатова И.И.) – отзыв положительный, с замечанием:

- по материалам автореферата диссертации можно отметить наличие в тексте некоторых неточностей и описок, нечеткие и слишком мелкие, трудно читаемые числовые значения и надписи на некоторых рисунках, что не влияет на содержание работы в целом и не снижает ее достоинств.

3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (заведующий лабораторией плазменно-пылевых процессов в космических объектах, д.ф.-м.н., профессор Попель С.И.) - отзыв положительный, без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., доцент Карасев В.Ю. является крупным ученым в области экспериментальных исследований плазменно-пылевых структур, находящихся в газовом разряде и помещенных в неоднородное магнитное поле.

1. Карасев В. Ю., Полищук В.А., Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А. Деграация поверхности частиц формальдегида в пылевой плазме // Известия РАН серия физическая, Т.87. №10, С.1430-1433, 2023;

2. Карасев В. Ю., Дзлиева Е. С., Майоров С. А., Новиков Л. А., Павлов С. И., Балабас М. В., Крылов И. Р. Распределения полидисперсных пылевых частиц в смесях инертных газов // Физика Плазмы, Т.48, №10, С. 914-918, 2022;

3. Карасев В. Ю., Абдирахманов А. Р., Дзлиева Е. С., Новиков Л. А., Павлов С. И., Досболаев М. К., Коданова С. К., Рамазанов Т. С. Вращение пылевой структуры в сильном неоднородном магнитном поле // Теплофизика высоких температур, Т. 59, № 5, С. 657, 2021.

- д.ф.-м.н., профессор Голубев Сергей Владимирович является признанным специалистом в области физики разрядной плазмы, автор более 150 научных работ, в том числе:

1. Голубев С. В., Водопьянов А. В., Глявин М. Ю., Лучинин А. Г., Разин С. В., Сафронова М. И., Сидоров А. В., Фокин А. П. Концентрация плазмы разряда, поддерживаемого в неоднородном потоке газа мощным излучением терагерцового диапазона частот // Письма в ЖТФ, 43:4 (2017), 10–17;

2. Golubev S.V., Gitlin M.S., Bogatov N.A., Razin S.V. Experimental study of the dynamics of fast gas heating in a low-pressure DC discharge in nitrogen // Plasma Physics and Controlled Fusion, 61 (3), 2019;

3. Golubev S.V., Sidorov A.V., Razin S.V., Safronova M.I., Fokin A. P., Luchinin A.G., Vodopyanov A.V., Glyavin M.Yu. Measurement of plasma density in the discharge maintained in a nonuniform gas flow by a high-power terahertz-wave gyrotron // Physics of Plasmas 23, 043511, 2016.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН наук является профильной организацией, специализирующейся на проведении исследований в области физики пылевой плазмы, включая основы ее применения в технологических процессах, теоретическом и экспериментальном изучении систем многих частиц, моделировании кластеров. В теоретическом отделе ведутся интенсивные работы по изучению пылевых структур в плазменной среде, эволюции плазменных кристаллов и цепочек пылевых частиц.

1. Salnikov M.V., Fedoseev A.V., Sukhinin G.I. Plasma parameters around a chain-like structure of dust particles in an external electric field // *Molecules*, vol. 26, no. 13, p. 3846, 2021;
2. Sukhinin G.I., Salnikov M.V., Fedoseev A.V., Rostom A. Plasma polarization and wake formation behind a dust particle in an external electric field // *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 46, no. 4, p. 749-754, 2018;
3. Fedoseev A.V., Demin N.A., Salnikov M.V., Sukhinin G.I. Non-local electron kinetics around the cloud of dust particles // *Contributions to Plasma Physics*, vol. 59, no. 5, p. e201800181, 2019.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– Показано, что одиночные коллоидные частицы с поглощающей поверхностью под действием лазерного излучения в трехмерной ловушке тлеющего разряда постоянного тока совершают активное броуновское движение, т.е. преобразуют энергию излучения в кинетическую энергию;

– Экспериментально изучена динамика одиночных частиц с поглощающей поверхностью и без поглощения при воздействии лазерного излучения различной плотности мощности в трехмерной ловушке тлеющего разряда постоянного тока. На малых временах частицы демонстрируют баллистический режим движения, начиная с момента времени $t \sim 0.1$ с

наблюдается режим движения «в ловушке» с определенным периодом. Для янус-частиц среднее квадратичное смещение является наибольшим за одинаковый промежуток времени по сравнению с МФ частицами в медной оболочке и без поглощающего покрытия;

– Экспериментально показано, что воздействие лазерного излучения на квазиодномерные (цепочечные) структуры влияет по-разному на структуры из частиц МФ в медной оболочке и из янус-частиц. С увеличением интенсивности лазерного излучения увеличивалась средняя кинетическая энергия коллоидных частиц. Однако, для янус-частиц это изменение было немонотонным;

– С увеличением интенсивности лазерного воздействия для обоих типов частиц в цепочечных структурах за одинаковый временной промежуток наблюдалось увеличение среднее квадратичного смещения. Для янус-частиц это изменение было наибольшим по сравнению с частицами МФ в медной оболочке. Увеличение интенсивности лазерного излучения более чем в четыре раза приводит к изменению характера движения МФ частиц в медной оболочке, на графиках среднее квадратичных смещений от времени наблюдается соответствие режиму супердиффузии, асимптотики которого лежат в промежутке от t до t^2 ;

– Изучен механизм активного броуновского движения частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения. Действие лазерного излучения на частицу может привести к появлению радиометрической силы, связанной с поглощением на поверхности частиц, изучаемые частицы имеют неоднородное покрытие, что в свою очередь приводит к неравномерному распределению температуры по поверхности частицы. В результате интенсивность поступательного и вращательного движения частицы увеличиваются и, таким образом наблюдается активное броуновское движение.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– Установлено, что уединенные коллоидные частицы с поглощающей поверхностью и в квазиодномерных (цепочечных) структурах под действием лазерного излучения в трехмерной ловушке тлеющего разряда постоянного тока совершают активное броуновское движение, т.е. преобразуют энергию излучения в кинетическую энергию;

– Изучен механизм активного броуновского движения частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения. Явление, приводящее к радиометрическому эффекту, имеет молекулярно-кинетическую природу: сталкивающиеся молекулы газа с более нагретой поверхностью частицы после отскока имеют более высокую кинетическую энергию, чем молекулы, сталкивающиеся с ее менее нагретой областью. Это означает, что молекулы, отражаясь от более нагретой области частицы, придают ей больший импульс, чем молекулы, отраженные от менее нагретой части. Таким образом, возникает спонтанное нарушение симметрии, и частице передается нескомпенсированный импульс, флуктуирующий по величине и направлению. В результате интенсивность поступательного и вращательного движения частицы увеличиваются и, таким образом наблюдается активное броуновское движение.

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

Результаты исследований, представленных в данной работе, затрагивают сразу несколько областей науки, такие как: физика диссипативных структур, физика низкотемпературной, в том числе пылевой плазмы, физика неравновесных систем. Результаты экспериментальных исследований, представленных в данной диссертационной работе, могут оказаться полезными широкому кругу специалистов, в том числе занимающихся изучением физических свойств сильно неидеальных кулоновских систем и разработкой приложений, связанных с их использованием. В частности, для решения актуальных задач, связанных с

оптимизацией транспортных процессов в активных средах.

Знания о динамике и способах управления активными броуновскими частицами могут оказаться полезными для контроля потоков вещества в миниатюрных устройствах, прицельной доставки лекарств или микроустройств к больным органам, разрушения вредных веществ в окружающей среде, при разработке каталитических нано- и микромоторов.

Представляется целесообразным использование результатов настоящей работы в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Объединенный институт высоких температур РАН», Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН», Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН» и других научных организациях.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что справедливость полученных результатов подтверждается использованием современных методик получения и анализа исходных экспериментальных данных; высокой точностью повторяемости в экспериментах на различных установках и согласием с результатами численных исследований и теоретическими предсказаниями других авторов. Обоснованность выводов и рекомендаций достигается: применением многократно апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата, обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских

научных конференциях, публикацией результатов диссертационного исследования в рецензируемых изданиях входящих в перечень ВАК.

Личный вклад соискателя состоит в развитии конкретных направлений в рамках обозначенной тематики работы, постановке экспериментов. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором при проведении экспериментов. Автор принимал активное участие в подготовке и проведении экспериментальных работ, обработке и анализе результатов; автор активно участвовал в совместных обсуждениях и подготовке рукописей к публикации.

Апробация результатов исследования проводилась на 12 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Светлов Антон Сергеевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

На заседании от 27.12.2023г. диссертационный совет принял решение за выполнение научной задачи, имеющей значение для исследования активного броуновского движения частиц и структур из них в газоразрядной плазме, присудить Светлову Антону Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) в количестве 25 человек, из них очно: 10 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 6 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 2 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 24, против 0, недействительных бюллетеней - 1.

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., профессор

Храпак А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.

27.12.2023г.