

**Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Абрамова Ильи Сергеевича**

"Формирование неоднородных потоков неравновесной плазмы
многозарядных ионов в условиях микроволнового разряда",
представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.9 – "Физика плазмы".

В диссертационной работе решается ряд важных прикладных задач: развит теоретический метод описания динамики потока неравновесной плазмы в условиях многократной ионизации электронным ударом; исследован эффект запираания ультрафиолетового излучения в плотной плазме многозарядных ионов, поддерживаемой в условиях резонансного микроволнового разряда; исследовано поглощения микроволнового излучения неоднородным потоком неравновесной плазмы; развиты методы оптимизации источника экстремального ультрафиолетового излучения на основе микроволнового разряда в открытой магнитной ловушке и на основе субтерагерцового разряда в потоке ксенона, свободно расширяющегося в вакуумную камеру; исследовано расширение неравновесной плазмы с горячими электронами к проводящей стенке в спадающем магнитном поле. В результате проведенной работы диссертант внес значительный вклад в развитие теории стационарного течения излучающей неравновесной плазмы многозарядных ионов, поддерживаемой за счет резонансного нагрева ее электронов электромагнитным излучением микроволнового и субтерагерцового диапазонов.

Диссертация содержит введение, четыре главы основного материала и заключение. Во введении обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертационной работы, отмечена научная новизна проведенных исследований, описаны использованные методы и подходы, приведены основные положения, выносимые на защиту, замечания о научной и практической ценности, а также дано краткое содержание диссертационной работы. Первая глава посвящена теоретическому описанию динамики неоднородного потока неравновесной плазмы многозарядных ионов. Глава представляет собой последовательное изложение теории, являющейся результатом цикла работ диссертанта 2015 - 2018 гг., используемых для интерпретации и оптимизации проводимых экспериментов по генерации ЭУФ излучения.

Вторая глава диссертационной работы посвящена результатам использования гидродинамической модели неоднородного потока излучающей неравновесной плазмы многозарядных ионов, представленной в первой главе, для интерпретации и оптимизации

экспериментов по генерации ЭУФ излучения. В ней анализируются оптимальные режимы горения и предельные параметры разряда для двух концепций источника ЭУФ излучения: на основе дополнительного нагрева микроволновым излучением потока плазмы вакуумной дуги (Sn), каналируемого внешним магнитным полем, и субтерагерцового разряда в потоке газа (Xe), свободно расширяющегося в вакуумную камеру.

В третьей главе предложена самосогласованная модель квазиодномерного стационарного потока неравновесной плазмы, распространяющегося вдоль оси открытой магнитной ловушки и поддерживаемого высокочастотным электромагнитным полем. Предложенная модель позволяет качественно исследовать возможные режимы течения плазмы в присутствии наведенного внутреннего высокочастотного поля, усиленного вследствие дипольного резонанса с потоком плазмы, определить основные особенности и ключевые характеристики нелинейного поглощения энергии внешнего поля.

Четвертая глава посвящена исследованию течения неравновесной плазмы за пробкой открытой магнитной ловушки. В ней анализируется более широкий диапазон плотностей и температур плазмы, а также коэффициентов расширения потока. Поскольку расширение плазмы к собирающей стенке за пробкой ловушки используется не только в приложениях по созданию источников частиц и излучения, но и в больших ловушках для плазмы с субтермоядерными параметрами, исследование конвективных потерь энергии представляет большой интерес. В связи с необходимостью такого обобщения, математический аппарат описания динамики потока плазмы здесь подвергается существенной модификации: в отличие от примененного в предыдущих главах полностью гидродинамического описания, приводится анализ функции распределения электронов плазмы по скоростям по мере расширения потока.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Основные результаты, представленные в диссертации, получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. В диссертационной работе используются современные хорошо обоснованные аналитические и численные методы решения электродинамических задач. Результаты диссертации опубликованы в ведущих реферируемых отечественных и иностранных журналах из списка ВАК: «Известия вузов. Радиофизика», Журнал экспериментальной и теоретической физики, Physics of Plasmas, Nuclear Fusion, Appl. Phys. Lett., Phys., Rev. Applied. Материалы диссертации докладывались на международных конференциях и семинарах. Они хорошо известны специалистам, что также подтверждает их достоверность. В частности, по материалам кандидатской диссертации Абрамовым И.С. был сделан доклад на научном семинаре в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, который получил высокую оценку слушателей.

Диссертационная работа производит очень хорошее впечатление. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке надежного источника ЭУФ излучения и при определении параметров плазмы при экспериментах на открытой ловушке. Тем не менее,

диссертационная работа несвободна от недостатков, делающих необходимыми следующие замечания.

Замечания по работе:

1. Стр.16, уравнение 1.1. Диссертант учитывает различные источники и механизмы потерь многозарядных ионов. Однако, рекомбинация, которая, на первый взгляд, должна играть важную роль, игнорируется. Было бы разумным более подробно обсудить возможность пренебрежения этим механизмом.

2. Стр. 18. При записи уравнения баланса импульса (1.6) оставлена только продольная компонента вдоль потока. Диссертант полагает, что в поперечном направлении силы либо компенсируются, либо отсутствуют в силу симметрии. Было бы разумным привести оценки, подтверждающие это предположение.

3. Стр. 18. Начиная с уравнения (1.8) и далее диссертант для обозначения скорости звука использует «с». Обычно в литературе эта буква «закреплена» за скоростью света, а скорость звука обозначается «с_з». Это замечание не является принципиальным, а связано с удобством восприятия материала.

4. Стр. 26. В отсутствие информации о функции распределения электронов по скоростям в разрядах исследуемого типа, для поиска констант ионизации моноэнергетические сечения ионизации электронным ударом усреднены по максвелловской функции распределения.

Было бы разумным привести какие-то дополнительные доводы и соображения, которые позволяют считать функцию распределения равновесной. Насколько вообще можно говорить о равновесности в таком разряде?

5. Стр. 50-51. В разделе, где обсуждается источник ЭУФ излучения, я не нашел анализа его диаграммы направленности. Было бы интересно увидеть аналитическую формулу.

6. Стр 74-75. При анализе поглощения волны, падающей на столб плазмы, учитываются два механизма – столкновения электронов и ионов, а также генерация плазменных волн вследствие неоднородности плазмы поперек оси z. При этом, поглощение, связанное с генерацией плазменных волн, учитывается качественно, т.е. переопределением эффективной частоты соударений. Почему нельзя учесть его последовательно и явно?

7. Стр 75. Пондеромоторная сила была вычислена диссертантом в одночастичном приближении. Почему нельзя было вычислить ее в гидродинамическом приближении?

8. Стр 89. В четвертой главе обсуждается поток неравновесной плазмы за пробкой открытой магнитной ловушки. Область расширения плазмы условно разделена диссертантом на три части, характеризующиеся качественно различными функциями распределения электронов по скоростям. Создается ощущение, что в каждой из трех частей плазма предполагается квазиравновесной с принципиально различными функциями распределения в каждой. Очевидно, что должно существовать два переходных слоя между 1-2 и 2-3 частями. Не являются ли размеры этих переходных слоев сопоставимыми с размерами самих частей?

Указанные замечания и приведенные вопросы не меняют общей положительной оценки диссертационной работы. Можно констатировать, что диссертация Абрамова Ильи Сергеевича весьма актуальна и выполнена на высоком научном уровне. Считаю, что диссертационная работа вполне соответствует критериям п.9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор настоящего диссертационного исследования Абрамов Ильи Сергеевич безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – "Физика плазмы".

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Доктор физико-математических наук
по специальности физика плазмы (01.04.08),
зав. лабораторией теоретического
моделирования плазменных процессов,
ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук (ФТИ им. Иоффе)
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26
Тел. 8 (812) 297-22-45
Моб. +7-(906) 277-80-72
e-mail: a.porov@mail.ioffe.ru

Попов Алексей Юрьевич
2 ноября 2021 г.

Подпись Попова А.Ю. заверяю,
Ученый секретарь ФТИ им. Иоффе,
к.ф.м.н.



Патров М.И.