

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки
Федерального
исследовательского центра
«Институт общей физики
им. А.М. Прохорова
Российской академии наук»
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.



 / Гарнов С.В./

« 09 » мая 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Абрамова Ильи Сергеевича «Формирование неоднородных потоков неравновесной плазмы многозарядных ионов в условиях микроволнового разряда», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы»

Создание в ИПФ РАН источников экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения на основе энергонапряжённых разрядов в потоках паров олова и инертных газов, создаваемых излучением субтерагерцовых гиротронов, потребовало разработки теории процессов, протекающих в разрядах такого рода. Это делает работу **актуальной**.

Целью диссертационной работы является развитие теории стационарного течения излучающей неравновесной плазмы многозарядных ионов, поддерживаемой за счёт резонансного нагрева её электронов электромагнитным излучением микроволнового и субтерагерцового диапазонов.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из четырёх глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации составляет 116 страниц, включая 42 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 87 наименований и 27 опубликованных работ диссертанта.

Содержание диссертационной работы. В трёх главах диссертации изложены результаты теоретического анализа гидродинамического описания течения плазмы многозарядных ионов, создаваемой в условиях микроволнового разряда (**глава I**). Результаты исследования разработанной в первой главе модели стационарного квазиодномерного течения плазмы для расчётов характеристик источников многозарядных ионов олова и ксенона, включая мощность ЭУФ излучения в расширяющейся плазме микроволновых разрядов (**глава II**) и результаты теории пондеромоторного воздействия микроволнового излучения на характеристики течения неоднородных плазменных потоков в открытых магнитных ловушках и поглощения в них микроволн (**глава III**). В четвёртой главе выполнен теоретический анализ динамики течения и характеристик неоднородной плазмы за магнитной пробкой в пробочной конфигурации магнитного поля.

Все перечисленные вопросы теории неоднородных потоков неравновесной плазмы многозарядных ионов диссертантом были успешно проанализированы и получены впервые результаты сопоставления экспериментальных данных с теоретическими расчётами, позволившие прогнозировать создание источников ЭУФ излучения с более высокими характеристиками, чем были достигнуты до сих пор.

В первой главе диссертации сформулирована и проанализирована гидродинамическая система уравнений стационарного течения

неоднородного квазиодномерного потока неравновесной многозарядной плазмы в предположении, что длина теплопроводности много больше длины ионизации, что температура электронов однородна по оси потока, а длина свободного пробега ионов много меньше характерного размера ионизации. В результате анализа уравнений было показано, что существует 5 классов течения. Для описания экспериментальных результатов было выбрано решение, описывающее течение с гладким переходом из режима дозвукового течения в сверхзвуковой, что соответствует условиям создания плазмы в микроволновых разрядах. Для такого типа течения с переходом скорости потока через звуковой барьер определены конвективные потери энергии и потери энергии на излучение с учётом запираания излучения в оптически плотной плазме и сформулирован закон сохранения энергии. Для этих условий обсуждается применимость изотермического приближения, влияние эффекта перезарядки ионов на нейтралах. Показано, что в конкретных режимах реализации источников ЭУФ излучения плазмы паров олова и ксенона условия применимости выполнены.

Во второй главе диссертации рассмотрены две модели источников ЭУФ излучения на основе микроволновых разрядов в потоке паров олова в магнитном поле открытой ловушки пробочной конфигурации и в потоке ксенона в отсутствие магнитного поля при свободном распространении потоков в вакууме. Предложены схемы источников, сформулированы их математические модели, рассчитаны их характеристики и предельные параметры, оценены перспективы их использования в проекционной литографии. Показано, что источники ЭУФ с использованием разрядов, создаваемых излучением субтерагерцовых гиротронов, вполне конкурентны по отношению к лазерным источникам плазмы.

Выполнены расчёты характеристик микроволновых разрядов, создаваемых с помощью излучения гиротронов в экспериментах ИПФ РАН. Показано, что результаты расчётов позволяют объяснить ограниченный набор экспериментальных данных, полученных в исследованиях ИПФ РАН.

Здесь необходимо подчеркнуть, что имеющиеся методы диагностики плазмы не позволяют определять характеристики плазмы, полученные как результат теоретического моделирования физических процессов в источниках ЭУФ. Тем не менее, диссертанту удалось провести анализ, используя данные о мощности микроволнового излучения, геометрию потоков и данные о давлении ксенона, токах в дуговом источнике плазмы паров олова. Выполненный во второй главе анализ безусловно нужно отнести к значительному достижению диссертанта.

В третьей главе диссертации в квазистатическом приближении рассмотрено течение плазмы в магнитном поле прямой ловушки пробочной конфигурации в условиях реализации дипольного резонанса для микроволнового излучения в тонкой плазменной струе с поперечником много меньше длины волны излучения. Построена модель пондеромоторного воздействия микроволнового излучения на одномерные течения плазменного потока за счёт усреднённой высокочастотной силы. Рассмотрены режимы слабого и сильного нелинейного воздействия на течение без разрывов, а также проанализированы и течения с разрывом. Выполнены расчёты поглощения энергии микроволн. В режиме нелинейного воздействия на течение струи показано нелинейное возрастание поглощения микроволн в результате увеличения длины области с резонансной плотностью плазмы. Установлены и определены значения плотности энергии микроволн, при которых реализуются режимы течения без разрывов.

В четвёртой главе выполнено расширение развитой в первой главе гидродинамической теории на анализ течения плазмы в вакуум в расширителе открытой магнитной ловушки. Диссертантом предложена и развита гибридная модель течения плазмы в расширителе. Использование гидродинамической модели позволило определить размеры пространственной области, в которой сохраняется гидродинамический закон течения и определить величину падения потенциала. Пространство от магнитной пробки до торцевой пластины было разбито на две области:

область столкновительного расширения потока, в которой выполняются законы гидродинамики, и область кинетического расширения, в которой, по существу, выполняются законы бесстолкновительного движения заряженных частиц. В результате такого подхода удаётся определить ход потенциала от магнитной пробки до торца, поглощающего частицы. При этом было обнаружено возникновение группы запертых электронов, определяющих величину концентрации электронов у торца ловушки. Анализ в данной модели продемонстрировал уменьшение потенциала в области кинетического расширения более чем в два раза по сравнению с результатами, полученными в более ранних теоретических работах. Диссертантом было получено совпадение в пределах ошибок измерений результатов расчётов с результатами измерений на установке ГДЛ ИЯФ СО РАН.

В заключении диссертации представлены основные результаты проведенных исследований поставленных научных задач.

Новизна исследований и полученных результатов.

Анализ содержания четырёх глав диссертации показывает, что её автором впервые построена гидродинамическая модель стационарного течения потока неравновесной плазмы с переменным ионным составом, предложена техника решения разработанных уравнений, выполнен расчёт излучения многозарядных ионов олова и ксенона в условиях мультиплетного расщепления спектральных термов, установлены предельные параметры источников многозарядных ионов олова и ксенона, исследовано влияния дипольного резонанса в магнитном поле на течение плазменной струи и поглощение микроволн в магнитном поле открытой магнитной ловушки, развит новый подход к определению профиля полного поля в расширителе открытой магнитной ловушки.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать для использования в организациях, ведущих исследования в области физики

плазмы, радиофизики – НИЦ "Курчатовский институт", ИОФ РАН, ИПФ РАН, НИЯУ «МИФИ», РТУ МИРЭА, ИЯФ СО РАН, ФТИ РАН, ИТЭР-Центр.

Остановимся теперь на нескольких **замечаниях** к представленной к защите диссертации. (1) Поскольку в диссертации созданы теоретические основы и модели микроволновых разрядов источников ЭУФ излучения плазмы многозарядных ионов, использующих резонансное поглощение микроволн, то в тексте диссертации целесообразно было бы подробнее обсудить результаты численных расчётов полученных уравнений, связывая характер полученных кривых с отдельными физическими процессами. Например, следовало бы пояснить причину роста плотности плазмы в потоке при его движении в спадающем поле в центре открытой магнитной ловушки (глава II).

(2) Поглощённая в потоке плазмы энергия нормирована (рис. 3в главы III) на полную энергию в потоке. Полученную малую величину ($\sim 10^{-3}$), надо пояснить, имея в виду высокие значения (20 ÷ 30%) коэффициента преобразования мощности микроволн в мощность ЭУФ излучения (глава II).

(3) При анализе влияния сил, возникающих в условиях дипольного резонанса, на течение плазмы не приведена подробная схема пространственной картины взаимодействия микроволн с потоком плазмы в ловушке.

(4) Результаты главы III хорошо было бы дополнить анализом возможного влияния на дипольный резонанс отсутствия резкой радиальной границы (масштаба дебаевского слоя у стенки) в реальных плазменных струях, а также роль верхнегибридного резонанса, возможно присутствующего в этой области плазменной струи.

(5) Очень лаконична формулировка результатов исследования по главам (за исключением главы IV). Это несколько искупается развёрнутыми формулировками в автореферате, который почти полностью приведён в разделе «Введение» в диссертации.

Высказанные выше замечания не меняют общую высокую оценку диссертации И.С. Абрамова. В целом диссертация представляет собою завершённое, многогранное и глубокое теоретическое исследование физики процессов в неоднородных потоках многозарядной плазмы на одном из магистральных направлений развития современных технологий. Диссертация безусловно соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор И.С. Абрамов заслуживает присвоения ему данной степени.

Текст работ, опубликованных по теме диссертации, соответствует её содержанию. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Достоверность полученных И.С. Абрамовым результатов подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых иностранных и отечественных научных журналах, а также представленными докладами на международных и российских конференциях.

Диссертация И.С. Абрамова полностью удовлетворяет требованиям, изложенным в пунктах 9 – 11, 13 и 14 действующего "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 11 сентября 2021 г. № 1539), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Илья Сергеевич Абрамов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы».

Отзыв составлен главным научным сотрудником ИОФ РАН, доктором физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы», профессором Германом Михайловичем Батановым, тел.: (8)-499-503-87-77, доб. 5-44, e-mail: german.batanov@yandex.ru, адрес: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, на основе обсуждения содержания диссертации на

семинаре отдела физики плазмы ИОФ РАН, который состоялся 09 ноября 2021 г.

Отзыв обсуждён и одобрен на заседании Учёного совета отдела физики плазмы ИОФ РАН, протокол № 462 от 09 ноября 2021 г.

С обработкой моих личных данных, связанных с защитой диссертации, согласен.

Главный научный сотрудник

отдела физики плазмы ИОФ РАН, д.ф.-м.н.



Г.М. Батанов

Подпись главного научного сотрудника д.ф.-м.н. Г.М. Батанова заверяю

ВРИО ученого секретаря ИОФ РАН, д.ф.-м.н.



В.В. Глушков

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

телефон: +7 499 503 8724

e-mail: office@gpi.ru

<http://www.gpi.ru/>