

На правах рукописи



НИКОЛЕНКО Андрей Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ
ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
НА КРУПНОМАСШТАБНОЙ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ**

1. 3. 9 – физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель: Гущин Михаил Евгеньевич, заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Тищенко Владимир Николаевич, главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, ФГБУН «Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Новосибирск);

Крауз Вячеслав Иванович, начальник лаборатории, кандидат физико-математических наук, ФГБУ «Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“» (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук» (г. Москва)

Защита состоится «15» декабря 2025 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ИПФ РАН: ipfran.ru

Автореферат разослан 10 ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному исследованию комплекса явлений, развивающихся при разлете плазменных струй, создаваемых компактными коаксиальными генераторами на основе импульсного эрозионного разряда на поверхности диэлектрика (полиэтилена), в квазиоднородном магнитном поле в большой плазменной камере. Такие исследования представляют интерес, в первую очередь, в контексте ограниченного моделирования различных эффектов, характерных для активных экспериментов в ближнем космосе и астрофизических явлений. С использованием источников импульсных потоков углеродно-водородной плазмы со скоростями 20–50 км/с и созданного диагностического комплекса, включающего зондовые и бесконтактные (оптические и СВЧ) диагностики, исследована динамика возникающих возмущений фоновой среды – магнитного поля и фоновой плазмы; изучены неустойчивости, развивающиеся на границе плазмы, из которых наибольший интерес представляет неустойчивость Рэля – Тейлора в режиме незамагниченных ионов. Изучено коллимированное струйное течение плазмы поперек магнитного поля в вакууме – «плазменный лист», распространяющееся на расстояние более 1 м от точки инжекции при толщине, обратно пропорциональной величине индукции внешнего магнитного поля.

Актуальность темы

Задача о разлете облака плотной плазмы при наличии внешнего магнитного поля и фоновой среды возникает в различных областях экспериментальной физики плазмы, геофизики и астрофизики, включая разработки систем инжекции ионизированного вещества в установки магнитного УТС [1, 2], исследования процессов взрывного типа в околоземном космическом пространстве [3, 4] и в дальнем космосе [5, 6]. Аналогичные задачи решаются при разработке схем магнито-инерциального УТС [7] и в высокоэнергетических лазерно-плазменных экспериментах, моделирующих мощные астрофизические события [8].

Много ценной информации о разлете плазменных струй в фоновую среду дали активные эксперименты, проводившиеся с конца 1960-х годов в ионосфере и магнитосфере Земли [9]. За полвека исследований отработаны различные сценарии создания в космосе искусственных плазменных образований, включая использование взрывных генераторов, инжектирующих потоки плазмы (эксперименты «Флаксус» [10], «North Star» [11]) или легко ионизируемых веществ, таких как барий, литий или цезий (эксперименты «Всполох» [12], «Trigger» [13], AMPTE [14], CRRES [15], CRIT [16]), а также включение электроразрядных генераторов, размещаемых на борту космических аппаратов (эксперименты АПЭКС [17], «Porcupine» [18]). Эти эксперименты позволили существенно продвинуться в понимании физических про-

цессов в околоземной плазменной среде, характеристик ее реакции на внешнее воздействие, трассирования естественных электрических и магнитных полей. В то же время, такие эксперименты обладают рядом принципиальных недостатков, к которым можно отнести низкую воспроизводимость результатов и сложность интерпретации экспериментальных данных, получаемых в неконтролируемых внешних условиях. В результате сохраняют актуальность вопросы, связанные с геометрией разлета плазмы, временем жизни диамагнитных каверн и корпускулярных остатков облака, механизмами торможения ионов облака и природой развивающихся в нем неустойчивостей.

В этой связи перспективным подходом считается проведение экспериментальных исследований процессов разлета плазменных струй и облаков в лаборатории, включая целенаправленное моделирование космических эффектов с использованием преобразований подобия [19]. Такие эксперименты были начаты еще на рубеже 60х годов XX века с коаксиальными плазменными пушками [20] и тета-пинчами [21]. В 1990-х годах с помощью коаксиальных ускорителей успешно моделировались плазменные струи активных экспериментов «Флакрус» и «North Star» [22]. Сегодня модельные эксперименты часто проводятся с облаками лазерной плазмы, расширяющимися в вакуум или в замагниченную фоновую ионизированную среду [23–25]. Лазерная абляция твердотельной мишени, установленной в центральной части достаточно большой вакуумной камеры с источниками магнитного поля и фоновой плазмы, позволяет приблизить постановку модельного эксперимента к космическим условиям, что упрощает задачу верификации разрабатываемых моделей и расчетных средств. Однако нельзя забывать о том, что мощные импульсные лазеры дороги, сложны в эксплуатации и не работают с высокой частотой повторения. Для лабораторного исследования импульсных плазменных процессов важны как высокая воспроизводимость параметров плазмы от одного цикла работы к другому, так и высокая частота повторения импульсов создания плазмы, позволяющие накапливать большие массивы экспериментальных данных со сканированием по параметрам. Поэтому вполне оправданным выглядит возврат к более простым и дешевым генераторам – коаксиальным электродинамическим ускорителям (плазменным пушкам).

В последнее время наблюдается тенденция к более активному применению плазменных пушек и в лабораторной астрофизике [26–29]. В частности, электродинамические ускорители позволяют воспроизводить в лабораторных условиях плазменные структуры, подобные астрофизическим джетам [27, 28]. Эксперименты с плотными плазменными струями имеют особое значение для понимания таких астрофизических процессов как аккреция ионизированного вещества и генерация плазменных струй (джетов) в окрестности молодых звездных объектов (МЗО). Поэтому данный процесс

активно моделируется в лабораторных экспериментах [30], в которых плазменные потоки сталкиваются с внешним поперечным магнитным полем.

Актуальность темы диссертации определяется, в первую очередь, необходимостью получения надежных и хорошо воспроизводимых экспериментальных данных о процессах, которые лежат в основе физики взаимодействия плотных высокоскоростных потоков ионизированного вещества с геофизической средой и с замагниченной плазмой астрофизических объектов.

Цели и задачи работы

Целью работы является экспериментальное исследование комплекса явлений, развивающихся при разлете плазменных струй, создаваемых компактными коаксиальными генераторами, в квазиоднородном магнитном поле в вакууме или фоновой плазме применительно к задачам ограниченного моделирования активных экспериментов и астрофизических плазменных явлений. Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач. Во-первых, создать источники плазменных струй и диагностический комплекс, включающий в себя контактные датчики (зонды) и бесконтактные диагностики, в том числе оптические и микроволновые. Во-вторых, экспериментально исследовать возмущения магнитного поля и возникающие неустойчивости при инжекции плазменных струй вдоль магнитного поля в вакууме и фоновой плазме. В-третьих, экспериментально исследовать свойства коллимированного струйного течения, формируемого при инжекции плазмы поперек магнитного поля в вакууме – «плазменного листа».

Научная новизна

Полученные в диссертации результаты являются оригинальными и новыми, что подтверждается их публикацией в ведущих рецензируемых научных журналах, а также апробацией на конференциях и научных школах.

Проведены лабораторные эксперименты по инжекции электроразрядной плазмы, создаваемой компактным коаксиальным генератором на основе эрзионного разряда, в «безграничном» режиме разлета в большом объеме с квазиоднородным магнитным полем с максимальным размером области взаимодействия плазмы и магнитного поля порядка одного метра во всех направлениях применительно к задачам моделирования динамики космической плазмы. Использование коаксиального генератора позволило исследовать задачу при ранее не изученном сочетании параметров по скорости и температуре частиц струи, параметрах замагниченности ионов и продолжительности инжекции плазмы.

Оценка энергии плазменной струи выполнена на основе комплексного подхода, включающего измерения возмущений магнитного поля, измерения концентрации плазмы, а также электрофизические расчеты. При относитель-

но низком уровне начальной энергии инжектируемой плазмы порядка 0,1 Дж удалось исследовать достаточно широкий спектр явлений, подобных наблюдаемым в активных космических экспериментах, а именно образование диамагнитных каверн с полным вытеснением внешнего поля, коллимацию плазмы внешним магнитным полем, развитие электромагнитных нижегибридных неустойчивостей на начальной стадии разлета и развитие желобковых неустойчивостей на стадии торможения плазмы.

Обнаружено, что неустойчивости на границе плазмы, развивающиеся в условиях достаточно продолжительной инжекции, не приводят к аномально быстрому проникновению магнитного поля в плазму: режим диффузии магнитного поля определяется классической электронной проводимостью и кулоновскими столкновениями.

Развивающаяся на границе плазмы желобковая неустойчивость классифицирована как неустойчивость Рэля – Тейлора в режиме незамагнитненных ионов; она исследована в диапазоне параметров $R_L/R_B \approx 3-5$ (где R_L – гирорадиус ионов, R_B – классический радиус торможения плазмы), ранее не реализованном в модельных лазерно-плазменных экспериментах.

За счет больших размеров камеры плазменного стенда «Крот» впервые исследован крупномасштабный коллимированный поток плазмы, формирующийся при инжекции плазменной струи поперек магнитного поля – «плазменный лист» с размерами более 1 м, распространяющийся за счет электрического поля поляризации; зондовыми методами и бесконтактными диагностиками удалось определить концентрацию электронов в «плазменном листе», восстановить структуру плазмы, включая динамику магнитного поля внутри плазменной струи.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты диссертационной работы имеют практическую значимость для постановки лабораторных экспериментов по моделированию разлета плазменных струй в магнитных полях различных конфигураций в присутствии различных фоновых сред, для планирования будущих натурных активных экспериментов и анализа уже проведенных, интерпретации данных наблюдательной астрономии в части динамики молодых звездных объектов и взрывов сверхновых. Результаты, полученные в условиях «безграничного» разлета плазмы в режиме незамагнитненных на масштабах струи ионов, могут быть основой для верификации численных моделей. Технология компактных коаксиальных генераторов на основе эрозионного разряда может применяться при разработке различных плазменных устройств, включая импульсные плазменные двигатели, сильноточные коммутаторы, системы инжекции плазмы в установки УТС.

Методология и методы исследования

Диссертационное исследование выполнено на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», входящем в состав уникальной научной установки «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН». Исследования включали в себя выбор параметров и изготовление источников плазмы – коаксиальных пушек различных исполнений, их оптимизацию. В лабораторном эксперименте использовался широкий арсенал диагностических средств. Зондовые диагностики включали в себя индуктивные магнитные зонды, электрический двойной зонд, коллектор ионов. Данные с зондовых диагностик дополнялись использованием бесконтактных методов, включавших в себя многоракурсную скоростную фотосъемку ICCD-камерой, в том числе в режиме двухкадровой съемки, а также изготовленный для проведения экспериментов микроволновый интерферометр. Ионный состав плазмы был определен с применением спектральной диагностики. Обработка экспериментальных данных проводилась в программных средах Matlab/Python. Для оценок и расчетов, включая определение параметров подобия лабораторных и космических экспериментов, использовался аналитический аппарат физики плазмы.

Положения, выносимые на защиту

1. Компактные коаксиальные генераторы на основе импульсного эрозийного разряда обеспечивают формирование струй углеродно-водородной плазмы с концентрацией более 10^{13} см^{-3} , скоростью 20–50 км/с и начальной энергией уровня 0,1 Дж, и на крупномасштабной лабораторной установке позволяют моделировать отдельные процессы, характерные для активных космических экспериментов и нестационарных астрофизических явлений, за счет реализации режима инжекции плазмы, близкого к разлету в безграничном пространстве.

2. Диффузия магнитного поля в плазму, заполняющую диамагнитную каверну при продолжительной инжекции струи ионизированного вещества, сопоставимой по длительности с характерным временем разлета и торможения плазмы, обусловлена классической электронной проводимостью и кулоновскими столкновениями; развитие неустойчивостей на границе плазмы не влияет на темп проникновения магнитного поля в каверну.

3. Желобковая неустойчивость, развивающаяся на боковой границе плазменной струи при ее инжекции вдоль магнитного поля в вакуум, представляет собой неустойчивость Рэлея – Тейлора в режиме немагнитных ионов. Для заданной начальной энергии плазменной струи число желобков, наблюдаемых на нелинейной стадии развития неустойчивости, практически постоянно (около 25) при изменении индукции внешнего магнитного поля в диапазоне одного порядка величины.

4. Плазменная струя, инжектируемая поперек квазиоднородного внешнего магнитного поля, за областью диамагнитной каверны формирует коллимированное струйное течение – «плазменный лист», толщина которого обратно пропорциональна индукции внешнего магнитного поля. Распространение плазменной струи поперек магнитного поля в вакууме на расстояние более 1 метра обусловлено электрическим полем поляризации, при этом возмущения внешнего магнитного поля внутри струи малы.

Апробация и достоверность результатов

По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 4 статьи [A1–A4] в рецензируемых ведущих научных журналах категории K1, а также 14 статей в сборниках трудов конференций и тезисов докладов на конференциях [A5–A18]. Все публикации по теме диссертации представлены в конце автореферата [A1–A18].

Результаты работы докладывались на семинарах ИПФ РАН, межинститутских семинарах, а также на следующих всероссийских и международных конференциях:

- XXII Научная конференция по радиофизике, посвященная 100-летию Нижегородской радиолaborатории (2018).
- XXIII Научная конференция по радиофизике, посвященная 100-летию со дня рождения Н.А. Железцова (2019).
- Ежегодные конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (2020, 2021, 2022, 2024, 2025).
- IV Международная научная конференция «Наука будущего» (2021).
- Международные Байкальские молодежные научные школы по фундаментальной физике (2022, 2024).
- I и II Научные школы Национального центра физики и математики «Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика» (2023, 2024).
- XXI научная школа «Нелинейные волны – 2024» (2024).
- VII международный симпозиум «Topical Problems of Nonlinear Wave Physics» (2025).

Личный вклад автора

Все результаты, изложенные в настоящей диссертации, получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Лабораторные эксперименты выполнены при участии коллектива сотрудников отдела геофизической электродинамики ИПФ РАН, при этом роль диссертанта в получении результатов является определяющей.

Результаты исследований динамики плазмы при разлете поперек магнитного поля обработаны и интерпретированы диссертантом; сами эксперимен-

ты выполнялись совместно с С. В. Коробковым, который также внес существенный вклад в разработку технологии изготовления коаксиальных генераторов. Изучение ионного состава плазмы коаксиального генератора методом пассивной ионной спектроскопии, а также исследование плазменного потока с использованием коллектора ионов осуществлялись при участии И. Ф. Шайхисламова, М. С. Руменских, А. А. Чибранова; обработка и интерпретация результатов осуществлялись автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 137 страниц, включая 67 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 94 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы основные цели и задачи работы, описаны методы исследования; обоснованы научная новизна, практическая и научная значимость полученных результатов; приведены положения, выносимые на защиту, охарактеризован личный вклад автора, а также приведен список научных трудов, подтверждающих достоверность полученных результатов.

Глава 1 содержит описание установки «Крот», на которой выполнялись исследования; представлены использованные для проведения экспериментов источники плазмы, средства и методы диагностики параметров плазмы. Сопоставляются безразмерные параметры струй лабораторной и космической плазмы на основе принципов подобия.

В **параграфе 1.1** приведен обзор существующих подходов к лабораторному моделированию плазменных потоков: сравниваются методы лазерной абляции и электроразрядные источники плазмы, в том числе коаксиальные плазменные пушки. Обоснован набор требований к коаксиальным генераторам, которые можно применять для исследований динамики плазменных струй в больших вакуумных камерах.

В **параграфе 1.2** описана установка, позволяющая реализовать условия «безграничного» разлета плазмы во внешнем магнитном поле. Приводятся параметры вакуумной камеры, систем генерации магнитного поля и фоновой плазмы.

В **параграфе 1.3** представлены конструкция и методика изготовления коаксиальных генераторов плазмы на основе эрозионного разряда, а также параметры импульсных источников высоковольтного питания.

В **параграфе 1.4** описан комплекс диагностик: магнитные и электрические зонды, коллектор ионов, ICCD-камеры для скоростной съемки, метод пассивной эмиссионной спектроскопии для определения ионного состава

плазмы, микроволновый интерферометр. Перечисленные методы обеспечили регистрацию концентрации плазмы, температуры электронов, скорости и пространственной структуры плазменных струй.

В **параграфе 1.5** описаны полученные параметры плазмы – скорость струи 20–50 км/с, концентрация электронов $n_e \sim 10^{13}$ – 10^{14} см⁻³, температура электронов 1–4 эВ; плазма эрозионного разряда образована протонами и ионами углерода невысокой зарядности (C¹⁺). Оценки различных безразмерных параметров, полученные на основе диагностических данных, показали, что по режиму замагниченности и бесстолкновительности частиц, энергетике струи и параметрам магнитной вязкости на плазменном стенде «Крот» возможно ограниченное моделирование эффектов, присущих некоторым активным космическим экспериментам, причем – с расширением области безразмерных параметров моделирования до значений, ранее не охваченных модельными экспериментами.

Результаты главы опубликованы в работах [A1–A2, A4].

Глава 2 посвящена экспериментам, нацеленным на исследование динамики диамагнитной каверны, создаваемой плазменной струей при инжекции вдоль внешнего магнитного поля в вакуум и в фоновую плазму.

Параграф 2.1 посвящен исследованию свойств диамагнитной каверны в вакууме. В **пункте 2.1.1** рассмотрена динамика диамагнитной каверны. Приведены результаты магнитных измерений, фиксирующих полное вытеснение внешнего магнитного поля до индукций $B_0 \approx 200$ – 400 Гс, в зависимости от энергии плазменной струи. По динамике диамагнитных возмущений в пространстве установлено, что объем диамагнитной каверны при изменении индукции B_0 меняется так, что величина энергии вытесненного магнитного поля $V_{cav} \cdot \Delta B^2 / 8\pi$ остается приблизительно постоянной – около 0,1 Дж при типичных параметрах эксперимента. В **пункте 2.1.2** исследована связь структуры каверны со структурой свечения плазменной струи (рис. 1), анализировался эффект коллимации струи при увеличении индукции B_0 . Профили каверны $\Delta B_x(x)$ и яркости свечения $I(x)$ качественно близки, но при съемке сбоку видимый поперечный размер плазмы оказывается больше размера каверны за счет желобковой неустойчивости, развивающейся на границе струи ионизированного вещества. В **параграфе 2.1.3** исследовано явление тока выноса из коаксиального генератора: установлено, что влияние тока выноса на структуру магнитных полей в окрестности диамагнитной каверны не существенно при индукциях внешнего магнитного поля $B_0 > 200$ Гс.

Параграф 2.2 посвящен особенностям динамики диамагнитных возмущений при инжекции плазменной струи в субальвовенском режиме в аргоновую фоновую плазму. В фоновой плазме каверна появляется раньше, чем в вакууме, и ее размер на начальном этапе несколько больше, что, предположительно, обусловлено эффектом «сгребания» более плотным плазменным облаком менее плотной фоновой плазмы. Режим взаимодействия плазмы

струи с фоновой плазмой при скоростях уровня 20 км/с следует считать столкновительным.

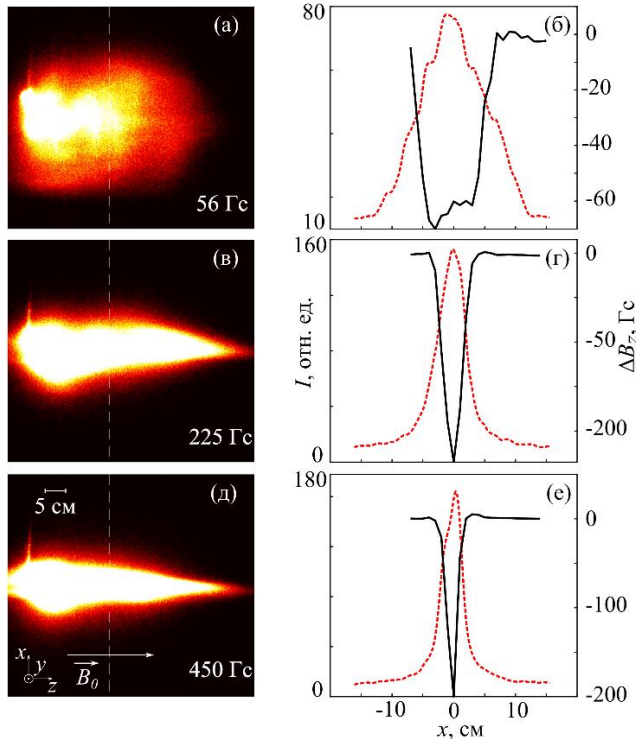


Рис. 1. Изображения плазменной струи в псевдоцвете (а, в, д), соответствующие им профили светимости плазмы $I(x)$ (пунктирные кривые) и профили диамагнитной каверны $\Delta B_z(x)$ (б, г, е) (сплошные кривые) в сечении $z = 10$ см при инъекции плазменной струи в магнитные поля различной индукции B_0 . Сечение, в котором установлен магнитный зонд, отмечено на изображениях белой штриховой линией

В **параграфе 2.3** приведены оценки энергии и пространственных масштабов плазменной струи. В **пункте 2.3.1** кинетическая энергия плазмы оценивается несколькими независимыми способами, получаемая оценка – около 0,1 Дж при типичных параметрах эксперимента. В **пункте 2.3.2** показано, что поперечный размер струи, инжектируемой вдоль магнитного поля, соответствует классическому радиусу торможения плазмы R_B , а длина струи определяется продолжительностью ее инъекции.

В **параграфе 2.4** рассматриваются электромагнитные неустойчивости нижнегибридного диапазона, развивающиеся в плазме, и их возможное влияние на темп восстановления магнитного поля в плазме. Неустойчивость проявляется в виде интенсивных всплесков магнитного сигнала с амплиту-

дой до 20% от пиковой величины диамагнитного эффекта, их спектр простирается почти до 10 МГц (рис. 2). При этом в условиях эксперимента, когда время инъекции плазмы сопоставимо с временем ее разлета и торможения, и диамагнитная каверна заполнена инжектируемой плазмой, время восстановления магнитного поля в объеме струи соответствует механизму классической диффузии поля за счет электронной проводимости плазмы, обусловленной кулоновскими столкновениями: неустойчивости нижнегибридного диапазона не приводят к аномальной проводимости, присущей, например, лазерно-плазменным экспериментам.

Результаты главы опубликованы в работах [A1–A9, A10–A15].

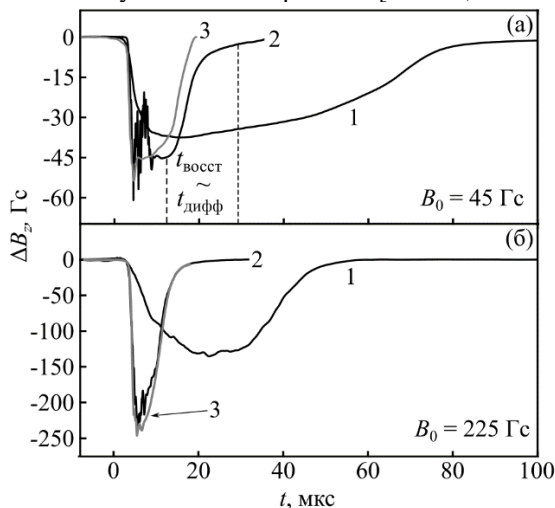


Рис. 2. Пример записей возмущения фонового магнитного поля уровня 50 Гс (а) и уровня 200 Гс (б) при инъекции струи различными коаксиальными пушками. 1 – пушка с $C = 50$ мкФ, $U = 3,5$ кВ и длинным импульсом тока (70 мкс); 2 – пушка с $C = 5$ мкФ, $U = 5$ кВ и укороченным импульсом тока (15 мкс); 3 – пушка с $C = 5$ мкФ, $U = 7$ кВ (11 мкс). Магнитный зонд располагался на расстоянии $z \approx 10$ см от точки инъекции

Глава 3 содержит результаты исследования желобковой неустойчивости, возникающей на границе плазменной струи при ее инъекции вдоль магнитного поля в вакуум и фоновую плазму.

В **параграфе 3.1** изложена модель желобковой неустойчивости Рэлея – Тейлора в режиме немагнитных ионов на основе [31].

В **параграфе 3.2** представлены общие свойства наблюдаемой желобковой неустойчивости в экспериментах по инъекции плазменной струи в магнитное поле $B_0 = 45\text{--}450$ Гс в вакууме при различных энергиях плазмы. Установлено, что при заданной энергии плазмы струи число желобков, наблюдаемых на границе, сохраняется приблизительно постоянным при из-

менении B_0 в 5 раз. В процессе эволюции плазмы число желобков за счет укрупнения и слияния уменьшается (рис. 3); на поздней стадии эволюции струи желобки закручиваются в направлении циклотронного вращения ионов. Особое значение имеет выявленная роль желобковой неустойчивости в поперечном транспорте плазмы – на поздних стадиях инжекции (до сотен микросекунд) плазменный поток теряет симметрию и распространяется поперек магнитного поля в виде нескольких струйных выбросов, сформированных в результате укрупнения и слияния желобков.

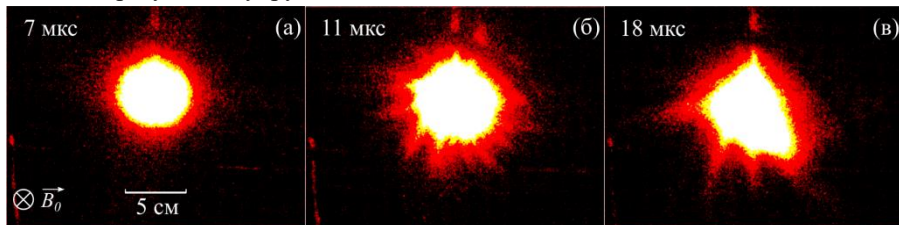


Рис. 3. Изображения (в псевдоцвете) плазменной струи, инжектируемой в магнитное поле $B_0 = 90$ Гс, в различные моменты времени (энергия в накопителе 40 Дж): 7 мкс после начала инжекции, что соответствует фазе расширения струи (а); 11 мкс — образование желобков на стадии торможения струи (б); 18 мкс — желобки сливаются в более крупные (в). Выдержка каждого кадра составляет 1 мкс

В параграфе 3.3 по построенным R - t диаграммам, отражающим движение края диамагнитной каверны и границы свечения плазмы, установлены скорость поперечного расширения плазмы на стадии развития неустойчивости, $V_{\perp} \approx 30$ км/с, и коэффициент торможения $g \approx 10^{12}$ см/с²; из обработки изображений и данных зондовых измерений определены масштаб градиента концентрации $L_n \approx 1$ см и число желобков $m_f \sim 25$.

Из полученных данных оценены волновые числа и инкременты неустойчивости по модели [31], что позволило уверенно классифицировать ее как неустойчивость Рэлея – Тейлора в режиме незамагниченных ионов на нелинейной стадии.

В параграфе 3.4 приводятся примеры картины развития желобковой неустойчивости при инжекции струи плазмы в нейтральный газ и в фоновую плазму.

В параграфе 3.5 полученные результаты обсуждаются в сравнении с данными других лабораторных и космических экспериментов, в которых исследовалась неустойчивость подобного типа. Показано, что проведенные исследования расширяют освоенный с лазерной плазмой диапазон значений параметра замагниченности ионов, определяемого как отношение гирорадиуса ионов к классическому радиусу торможения (обычно – порядка 1), до значений порядка 3–5. Экспериментальные данные, полученные при таких значениях параметра замагниченности, важны для дальнейшего развития

моделей желобковой неустойчивости на нелинейной стадии и их экспериментальной верификации.

Результаты главы опубликованы в работах [A3, A4, A7–A9, A11–A18].

Глава 4 посвящена экспериментам по исследованию динамики плазменных струй, инжектируемых поперек магнитного поля в вакуум, в которых наблюдается формирование крупномасштабного коллимированного струйного течения плазмы – «плазменного листа».

В **параграфе 4.1** дана общая характеристика плазменных струй, распространяющихся поперек магнитного поля, по результатам скоростной фоторегистрации. Эксперименты проводились при различных энергиях плазменной струи и, соответственно, при различных начальных скоростях потока (25–40 км/с). Инжектируемая струя плазмы движется поперек магнитного поля со скоростью, близкой к начальной, которая практически не зависит от величины B_0 . Вблизи точки инжекции наблюдается область с сильным возмущением магнитного поля, соответствующая диамагнитной каверне с масштабом $\sim R_B$, за пределами которой в плоскости, перпендикулярной магнитным силовым линиям, плазменный поток сжимается, образуя «лист», толщина которого меньше, чем гирорадиус ионов углерода (рис. 4). На границе диамагнитной каверны наблюдается неустойчивость желобкового типа. С увеличением индукции B_0 наблюдается коллимация – уменьшение толщины «плазменного листа». В плоскости, параллельной магнитным силовым линиям, плазма по мере движения растекается вдоль линий поля на масштабе порядка полуметра. В направлении инжекции струя распространяется на расстояние до 1,5 м (рис. 5): поперечное струйное течение такого масштаба удается получить и исследовать исключительно за счет размеров камеры стенда «Крот». Методами двухкадровой съемки зарегистрировано отклонение плазменного листа в сторону циклотронного вращения ионов. Кроме того, установлено, что распространение плазмы поперек магнитного поля за пределами диамагнитной каверны сопровождается развитием структурной неустойчивости струи: в плоскости «листа» наблюдаются отдельные филаменты, вытянутые вдоль B_0 . Методом двухкадровой съемки установлено, что эти структуры движутся вместе с потоком, но со скоростью, в 2–3 раза меньшей скорости переднего края «плазменного листа».

В **параграфе 4.2** приводятся результаты диагностических измерений параметров плазмы струи. В **пункте 4.2.1** дана оценка концентрации плазмы на основе независимых измерений СВЧ-интерферометром и электрическими зондами, согласно которой концентрация плазмы в области коллимированного «плазменного листа», составляет не менее $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В **пункте 4.2.2** приводятся результаты исследования динамики и структуры «плазменного листа» с помощью коллектора ионов, подтвердившие основные свойства такого течения – движение струи с практически постоянной скоростью за областью каверны, и явление коллимации струи внешним полем. В **пункте**

4.2.3 изложены результаты измерений возмущений магнитного поля в области «плазменного листа», из которых следует, что движущаяся за областью каверны плазменная струя, фактически, не возмущает магнитное поле: уровень ослабления магнитного поля соответствует величине давления замагниченных электронов с $T_e \sim 1$ эВ и $n_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В **пункте 4.2.4** по данным независимых бесконтактных и зондовых измерений в экспериментах с плазменными потоками с различной энергией и скоростью, инжектируемыми поперек внешнего квазиоднородного магнитного поля в вакуум, показано,

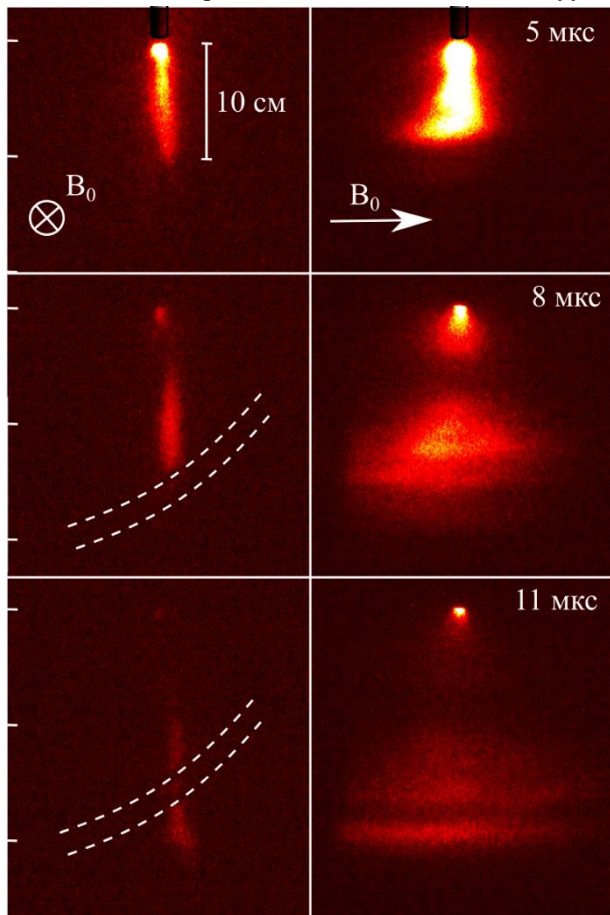


Рис. 4. Изображения (в псевдоцвете) коллимированной плазменной струи – «плазменного листа» в двух проекциях: вдоль и поперек внешнего магнитного поля индукцией 450 Гс для трех последовательных моментов времени; выдержка при съемке 1 мкс. Начальная скорость плазменной струи 30 км/с. Белым пунктиром на изображениях слева отмечена тень от кабелей внутри вакуумной камеры

что толщина «плазменного листа», формируемого в результате коллимации струи, обратно пропорциональна индукции магнитного поля.

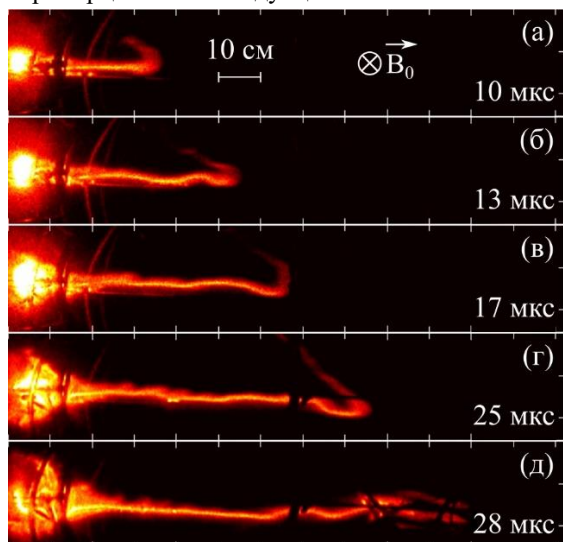


Рис. 5. Изображения (в псевдоцвете) плазменной струи, распространяющейся поперек магнитного поля $B_0 = 450$ Гс в последовательные моменты времени (10, 13, 17, 25, 28 мкс) после начала импульса тока генератора. Начальная скорость плазменной струи 40 км/с

В **параграфе 4.3** описан сценарий распространения «плазменного листа» более чем на 1 м поперек магнитного поля за область диамагнитной каверны за счет возникновения электрического поля поляризации, перпендикулярного вектору начальной скорости струи. Оценены условия поддержания электрического поляризации для эксперимента, определяемые поперечным масштабом плазменной струи и ее концентрацией, и показано, что структура и динамика плазменной струи за областью каверны полностью соответствуют ранее разработанной модели «плазменного конденсатора» [32].

Результаты главы опубликованы в работах [A3–A4, A10, A11–A13].

В **ЗАКЛЮЧЕНИИ** сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты диссертации

1. Для исследования динамики плазменных струй в магнитном поле в вакууме и в фоновой плазме созданы компактные коаксиальные генераторы углеродно-водородной плазмы на основе импульсного эрозионного разряда на полиэтилене. На плазменном стенде «Крот», характеризуемом рекордно большими масштабами области квазиоднородного магнитного поля и фоновой плазмы, использование таких генераторов позволяет реализовать режим

разлета плазменных струй, близкий к расширению в безграничном пространстве, который подходит для лабораторного моделирования эффектов активных экспериментов в ближнем космосе и нестационарных астрофизических явлений.

2. С помощью различных диагностик, включая электрические и магнитные зонды, электрооптические преобразователи для получения изображений плазмы в видимом свете (ICCD-камер), СВЧ-интерферометр, определены основные физические параметры получаемых плазменных струй: концентрация электронов $n_e \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$, температура электронов $T_e \sim 1 - 4 \text{ эВ}$, скорость плазменного потока $V_0 \sim 20 - 50 \text{ км/с}$ в зависимости от рабочего напряжения и тока коаксиального генератора. Методом пассивной эмиссионной спектроскопии оценен ионный состав плазменных струй, образуемых, в основном, протонами и ионами углерода низкой зарядности ($Z = 1$).

3. При инжекции плазменной струи с начальной энергией уровня 0,1 Дж вдоль магнитного поля в вакуум образуется диамагнитная каверна, при этом полное вытеснение магнитного поля наблюдается при индукциях внешнего поля до $B_0 \sim 200 - 400 \text{ Гс}$, в зависимости от энергии и скорости плазменной струи, а также от длительности инжекции. В широком диапазоне индукций внешнего магнитного поля радиус плазменной струи составляет величину порядка классического радиуса торможения, а размер вдоль поля определяется длительностью инжекции и начальной скоростью струи. При расширении плазменных струй со скоростями $V_0 \sim 10 - 20 \text{ км/с}$ вдоль магнитного поля в замагниченную фоновую плазму в субальбеновском режиме взаимодействия ионов струи с ионами фоновой плазмы носит столкновительный характер, и приводит к увлечению ионов фона и торможению струи.

4. Установлено, что при расширении плазменной струи в магнитном поле в вакууме развивается неустойчивость нижнегибридного диапазона, регистрируемая в магнитных измерениях в виде шумовых всплесков с амплитудой до 10% от величины внешнего магнитного поля, которые имеют наибольшую интенсивность на границе диамагнитной каверны. При этом режим диффузии магнитного поля в плазму струи, заполняющую диамагнитную каверну, близок к классическому, т.е. определяется спитцеровской проводимостью и кулоновскими столкновениями, а не аномальной проводимостью, обусловленной развитием неустойчивости.

5. Желобковая неустойчивость, развивающаяся на боковой границе плазменной струи при инжекции вдоль магнитного поля в вакууме, на основании результатов экспериментов классифицирована как неустойчивость Рэля – Тейлора в режиме сильно немагнитных ионов. Установлено, что на нелинейной стадии развития неустойчивости, наблюдаемой в эксперименте, для облака с заданной начальной энергией число возникающих желобков остается практически постоянным при изменении индукции внешнего магнитного поля в диапазоне порядка величины. На стадии распада струи после

окончания инъекции желобковая неустойчивость играет определяющую роль в процессах переноса: плазма распространяется в виде нескольких струйных выбросов поперек магнитного поля, образовавшихся в результате укрупнения и слияния желобков.

6. Экспериментально показано, что плазменная струя, инжектируемая поперек квазиоднородного внешнего магнитного поля в вакуум, за областью диамагнитной каверны формирует коллимированное струйное течение – «плазменный лист», толщина которого обратно пропорциональна индукции магнитного поля. Установлено, что коллимированная струя плазмы распространяется поперек внешнего магнитного поля на расстояние более 1 метра без существенных возмущений последнего за счет электрического поля поляризации. Подобный механизм прохождения плазменного потока через области с поперечным магнитным полем возможен в активных экспериментах, при аккреции вещества на молодые звездные объекты, а также при проникновении потоков звездного ветра в магнитосферы.

Список публикаций автора по теме диссертации

А1. Гуцин М. Е., Коробков С. В., Терехин В. А., Стриковский А. В., Гундорин В. И., Зудин И. Ю., Айдакина Н. А., Николенко А. С. Эксперименты по моделированию динамики плотного плазменного облака, расширяющегося в замагниченную фоновую плазму, на крупномасштабном стенде «Крот» // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108, №. 6. С. 416-421.

А2. Коробков С. В., Гуцин М. Е., Гундорин В. И., Зудин И. Ю., Айдакина Н. А., Стриковский А. В., Николенко А. С. Простейшая эрозийная плазменная пушка из коаксиального кабеля с полиэтиленовой изоляцией // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45, №. 5. С. 45-49.

А3. Коробков С. В., Николенко А. С., Гуцин М. Е., Стриковский А. В., Зудин И. Ю., Айдакина Н. А., Шайхисламов И. Ф., Руменских М. С., Земсков Р. С., Стародубцев М. В. Особенности динамики и неустойчивости плазменных струй, расширяющихся во внешнее магнитное поле, в лабораторных экспериментах с компактными коаксиальными генераторами плазмы на крупномасштабном стенде «Крот» // Астрономический журнал. 2023. Т. 100, № 1. С. 107-118.

А4. Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Айдакина Н. А., Стриковский А. В., Лоскутов К. Н. Динамика плазменного облака, формируемого компактной коаксиальной пушкой, при разлете в вакуум и фоновую плазму большого объема во внешнем магнитном поле // Физика плазмы. 2023. Т. 49, № 11. С. 1101-1117.

А5. Николенко А. С., Гуцин М. Е. Экспериментальное исследование динамики плотной плазменной струи в замагниченной фоновой плазме // Труды XXII Научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолaborатории. Нижний Новгород, 2018. С. 20-22.

А6. *Николенко А. С., Гуцин М. Е.* Экспериментальное исследование диамагнитных возмущений при инъекции плотного плазменного облака в замагниченную фоновую плазму большого объема // Труды XXIII Научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения Н.А. Железцова. Нижний Новгород, 2019. С. 33-36.

А7. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Гундорин В. И., Зудин И. Ю., Айдакина Н. А., Стриковский А. В.* Лабораторное исследование диамагнитных каверн и неустойчивостей при расширении плазменных облаков во внешнее магнитное поле и в фоновую плазму // Пятнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». Сборник тезисов. Москва, 2020. С. 119.

А8. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Гундорин В. И., Стриковский А. В., Айдакина Н. А.* Диагностика параметров плотных облаков плазмы в лабораторных экспериментах, моделирующих активные эксперименты в ближнем космосе // Шестнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». Сборник тезисов. Москва, 2021. С. 199.

А9. *Николенко А. С.* Лабораторное моделирование динамики плотного высокоскоростного облака плазмы при разлете в магнитном поле в большой плазменной камере // Сборник тезисов докладов четвертой международной научной конференции «Наука будущего» и шестого всероссийского молодежного научного форума «Наука будущего – наука молодых». Москва, 2021. С. 132.

А10. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Стриковский А. В., Шайхисламов И. Ф., Руменских М. С.* Микроволновая и оптическая диагностика плазменных облаков при лабораторном моделировании активных экспериментов в околоземной плазме // Семнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». Сборник тезисов. Москва, 2022. С. 181.

А11. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Стриковский А. В.* Лабораторное моделирование активных ионосферных экспериментов на крупномасштабном плазменном стенде «Крот» // Труды XVII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2022. С. 249-251.

А12. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Стриковский А. В.* Лабораторное моделирование динамики плотного высокоскоростного облака плазмы при разлете в магнитном поле в большой плазменной камере // I Всероссийская школа Национального центра физики и математики по экспериментальной лабораторной астрофизике и геофизике для студентов и молодых ученых. Тезисы. Саров, 2023. С. 73.

А13. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Стриковский А. В.* Лабораторное исследование разлета плазменных потоков во внешнем магнитном поле на крупномасштабной установке «Крот»

// Девятнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». Сборник тезисов. Москва, 2024. С. 205.

A14. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Стриковский А. В.* Применение коаксиального плазменного ускорителя и лазерной плазмы для моделирования импульсных потоков космической плазмы на стенде «Крот» // II Всероссийская школа Национального центра физики и математики по экспериментальной лабораторной астрофизике и геофизике для студентов и молодых ученых. Тезисы. Саров, 2024. С. 58-59.

A15. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Стриковский А. В.* Лабораторное моделирование околосолнечных и астрофизических плазменных струй на крупномасштабном плазменном стенде «Крот» // Труды XVIII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2024. С. 180-182.

A16. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Стриковский А. В.* Лабораторное исследование желобковой неустойчивости, развивающейся при разлете плазменного потока во внешнем магнитном поле // Нелинейные волны – 2024. XXI научная школа. Тезисы докладов. Бор, 2024. С. 165.

A17. *Николенко А. С., Гуцин М. Е., Коробков С. В., Зудин И. Ю., Айдакина Н. А., Плешков Д. С.* Экспериментальное исследование желобковой неустойчивости, развивающейся при разлете плазменного потока поперек магнитного поля // Двадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе». Сборник тезисов. Москва, 2025. С. 161.

A18. *Nikolenko A. S., Gushchin M. E., Korobkov S. V., Zudin I. Yu., Loskutov K. N., Istomin A. A., Strikovskiy A. V.* Development of flute instabilities during the expansion of plasma flows in a magnetic field in space plasma simulation experiments at Krot plasma device // International symposium «Topical Problems of Nonlinear Wave Physics». Abstracts. Moscow – St. Petersburg, 2025. P. 147.

Литература

1. *Marshall J.* Performance of a hydromagnetic plasma gun // *Phys. Fluids*. 1960. V. 3. P. 134.

2. *Блинов П. И., Черемных П. А.* Титановая коаксиальная пушка // *ТВТ*. 1967. Т. 5. С. 388.

3. *Oboyashi T.* Upper atmospheric disturbances due to high altitude nuclear explosions // *Planet. Space Sci.* 1963. V. 10. P. 47.

4. *Albee P. R., Kanellakos D. P.* A spatial model of the F-region ionospheric traveling disturbance following a low-altitude nuclear explosion // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 1039.

5. *Burrows A.* Supernova explosions in the universe // *Nature*. 2000. V. 403. P. 727.

6. *De Young D. S.* Astrophysical jets // *Science*. 1991. V. 252. P. 389.

7. Wurden G. A., Hsu S. C., Intrator T. P., Grabowski T. C., Degnan J. H., Domonkos M., Turchi P. J., Campbell E. M., Sinars D. B., Herrmann M. C., Betti R., Bauer B. S., Lindemuth I. R., Siemon R. E., Miller R. L., Laberge M., Delage M. Magneto-inertial fusion // *J. Fusion Energy*. 2016. V. 35. P. 69.
8. Albertazzi B., Ciardi A., Nakatsutsumi M., Vinci T., Béard J., Bonito R., Billette J., Borghesi M., Burkley Z., Chen S. N., Cowan T. E., Herrmannsdörfer T., Higginson D. P., Kroll F., Pikuz S. A., Naughton K., Romagnani L., Riconda C., Revet G., Riquier R., Schlenvoigt H. P., Skobelev I. Yu., Faenov A. Ya., Soloviev A., Huarte-Espinosa M., Frank A., Portugall O., Pépin H., Fuchs J. Laboratory formation of a scaled protostellar jet by coaligned poloidal magnetic field // *Science*. 2014. V. 346. P. 325.
9. Haerendel G. Experiments with plasmas artificially injected into near-Earth space // *Front. Astron. Space Sci.* 2019. V. 6. A. 29.
10. Gavrilov B. G., Podgorny A. I., Podgorny I. M., Sobyannin D. B., Zetzer J. I., Erlandson R. E., Meng C. I., Stoyanov B. J. Diamagnetic effect produced by the Fluxus-1 and -2 artificial plasma jet // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 1549.
11. Erlandson R. E., Meng C. I., Swaminathan P. K., Kumar C. K., Dogra V. K., Stoyanov B. J., Gavrilov B. G., Kiselev Y., Zetzer J. I., Stenbaek-Nielsen H. C., Lynch K. A., Pfaff R. F., Delamere P. A., Bounds S., Gatsonis N. A. North star plasma-jet space experiment // *J. Spacecr. Rockets*. 2004. V. 41. P. 483.
12. Dzubenko N. I., Zhilinsky A. P., Zhulin I. A., Ivchenko I. S., Molotai A. A., Rozhansky V. A., Ruzhin Yu. Ya., Skomarovsky V. S., Tsendin L. D. Dynamics of artificial plasma clouds in «Spolokh» experiments: Movement pattern // *Planet. Space Sci.* 1983. V. 31. P. 849.
13. Holmgren G., Bostrom R., Kelley M. C., Kintner P. M., Lundin R., Fahleson U. V., Bering E. A., Sheldon W. R. Trigger, an active release experiment that stimulated auroral particle precipitation and wave emissions // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85. P. 5043.
14. Bernhardt P. A., Roussel-Dupre R. A., Pongratz M. B., Haerendel G., Valenzuela A., Gurnett D. A., Anderson R. R. Observations and theory of the AMPTE magnetotail barium releases // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 5777.
15. Bernhard P. A. Probing the magnetosphere using chemical releases from the Combined Release and Radiation Effects Satellite // *Phys. Fluids B*. 1992. V. 4. P. 2249.
16. Torbert R. B., Kletzing C. A., Liou K., Rau D. Prompt ionization in the CRIT II barium releases // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 973.
17. Prech L., Ruzhin Y. Y., Dokukin V. S., Nemecek Z., Safrankova J. Overview of APEX project results // *Front. Astron. Space Sci.* 2018. V. 5. P. A46.
18. Haerendel G., Sagdeev R. Z. Artificial plasma jet in the ionosphere // *Adv. Space Res.* 1981. V. 1. P. 29.
19. Ryutov D. D. Scaling laws for dynamical plasma phenomena // *Phys. Plasmas*. 2018. V. 25. P. 100501.

20. *Friedman H. W., Patrick R. M.* Momentum transfer in plasma flows at high Alfvén Mach numbers // *Phys. Fluids*. 1971. V. 14. P. 1889.
21. *Morse D. L., Destler W. W.* Laboratory simulation of artificial plasma clouds in the ionosphere // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78. P. 7417.
22. *Gavrilov B. G., Erlandson R. E., Kiselev Y. N., Meng C. I., Podgorny I. M., Sobyenin D. B., Zetzer J. I.* Dynamics of a high energy plasma jet in space: in situ experiment and laboratory simulation // *Adv. Space Res.* 1998. V. 21. P. 773.
23. *Zakharov Y.P.* Collisionless laboratory astrophysics with lasers // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2003. V. 31. P. 1243.
24. *Тищенко В. Н., Захаров Ю. П., Шайхисламов И. Ф., Березуцкий А. Г., Бояринцев Э. Л., Мелехов А. В., Пономаренко А. Г., Посух В. Г., Прокопов П. А.* Торсионная альфвеновская и медленная магнитозвуковая волны, создаваемые плазмой в магнитном поле // *Письма в ЖЭТФ*. 2016. Т. 104. С. 303.
25. *Gekelman W., Van Zeeland M., Vincena S., Pribyl P.* Laboratory experiments on Alfvén waves caused by rapidly expanding plasmas and their relationship to space phenomena // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 1281.
26. *Underwood T. C., Loebner K. T., Miller V. A., Cappelli M. A.* Dynamic formation of stable current-driven plasma jets // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 1.
27. *Бескин В.С., Крауз В.И., Ламзин С.А.* Лабораторное моделирование струйных выбросов из молодых звезд на установках с плазменным фокусом // *УФН*. 2022. Т. 193. С. 345.
28. *Bellan P.M.* Experiments relevant to astrophysical jets // *J. Plasma Phys.* 2018. V. 84. P.755840501.
29. *Zhang Y., Fisher D. M., Gilmore M., Hsu S. C., Lynn A. G.* Experimental investigation of coaxial-gun-formed plasmas injected into a background transverse magnetic field or plasma // *Phys. Plasmas*. 2018. V. 25. P. 055709.
30. *Burdonov K., Bonito, R., Giannini, T., Aidakina N., Argiroffi C., Beard J., Chen S.N., Ciardi A., Ginzburg V., Gubskiy K., Gundorin V., Gushchin M., Kochetkov A., Korobkov S., Kuzmin A., Kuznetsov A., Pikuz S., Revet G., Ryzantsev S., Shaykin A., Shaykin I., Soloviev A., Starodubtsev M., Strikovskiy A., Yao W., Yakovlev I., Zemskov R., Zudin I., Khazanov E., Orlando S., Fuchs J.* Inferring possible magnetic field strength of accreting inflows in EXor-type objects from scaled laboratory experiments // *Astron. Astrophys.* 2021. V. 648. P. A81.
31. *Hassam A. B., Huba J. D.* Structuring of the AMPTE magnetotail barium releases // *Geophys. Res. Letters*. 1987. V. 14. P. 60.
32. *Peter W., Rostoker N.* Theory of plasma injection into a magnetic field // *Phys. Fluids*. 1982. V. 25. P. 730.

НИКОЛЕНКО Андрей Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ
ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
НА КРУПНОМАСШТАБНОЙ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ**

Автореферат

Подписано к печати 06.10.2025 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 36(2025).

Отпечатано на ризографе в типографии Института прикладной физики
им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46