

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

кандидата физико-математических наук Крауза Вячеслава Ивановича на  
диссертационную работу Николенко Андрея Сергеевича  
«Исследование динамики импульсных плазменных струй на  
крупномасштабной экспериментальной установке» на соискание учёной  
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 –  
Физика плазмы

### **Общая характеристика работы**

Диссертация Николенко А.С. посвящена экспериментальному исследованию процессов, происходящих при распространении плазменных струй, создаваемых компактными коаксиальными генераторами на основе эрозионного разряда, в магнитных полях различной ориентации. Работа направлена на моделирование отдельных эффектов, присущих активным космическим экспериментам и астрофизическим явлениям, и вносит вклад в направление лабораторной геофизики и астрофизики.

Автором разработаны и реализованы экспериментальные методики, обеспечивающие изучение плазменных потоков в условиях, соответствующих режимам холловской магнитной гидродинамики. В работе рассмотрены как продольная, так и поперечная инжекция плазмы относительно направления магнитного поля, что позволило охватить широкий спектр физических эффектов – от образования диамагнитных каверн и развития неустойчивостей до формирования крупномасштабных коллимированных структур.

### **Актуальность темы**

Исследование взаимодействия плазмы с магнитным полем и фоновыми средами является одним из ключевых направлений современной экспериментальной физики плазмы. Эти процессы лежат в основе как задач

управляемого термоядерного синтеза, так и явлений, наблюдавшихся в ионосфере, магнитосфере и астрофизических объектах.

Лабораторное моделирование с использованием параметров подобия дает возможность переносить результаты экспериментов на геофизические и космические масштабы, воспроизводя характерные процессы инжекции плазмы, формирования диамагнитных каверн и возникновения неустойчивостей. Особое значение имеют исследования в области холловской МГД, где разделение потоков электронов и ионов определяет динамику плазмы.

В этом контексте эксперименты, проведённые на установке «Крот» с использованием коаксиальных плазменных генераторов, представляют собой актуальное и своевременное исследование, обеспечивающее физическую интерпретацию процессов, наблюдавшихся, в том числе, в активных геофизических экспериментах.

### **Научная новизна**

Реализована инжекция плазмы, создаваемой эрозионным коаксиальным генератором, в крупномасштабное магнитное поле в «безграничном» режиме, позволяющая наблюдать процессы холловской МГД при разлёте плазмы с незамагниченными ионами, что является новой постановкой эксперимента в лабораторной астрофизике и геофизике.

Получены новые данные о структуре и динамике диамагнитной каверны, о распределении магнитных возмущений и токов, а также о характере восстановления магнитного поля, происходящего в режиме классической диффузии без признаков аномальной проводимости.

Исследованы нижнегибридные и желобковые неустойчивости при разлете плазменных струй; экспериментально установлено, что в конкретной лабораторной постановке последняя имеет природу неустойчивости Рэлея–

Тейлора в режиме существенно незамагниченных ионов. Впервые исследована динамика крупномасштабного плазменного потока — «плазменного листа» — при инжекции поперёк магнитного поля на масштабе более 1 м; получены данные о его пространственной структуре, распределении концентрации и магнитного поля.

## **Содержание и структура работы**

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.

**В введении** автор формулирует цели, задачи и научную новизну исследования, обосновывает актуальность выбранного направления.

**Первая глава** посвящена описанию экспериментальной базы — установки «Крот», коаксиальных генераторов плазмы и примененного диагностического комплекса, включающего как контактные, так и бесконтактные методы измерений.

**Во второй главе** приведены результаты исследования диамагнитных каверн, возникающих при продольной инжекции плазмы, и дана физическая интерпретация наблюдаемых магнитных возмущений.

**В третьей главе** подробно рассмотрены закономерности развития желобковой неустойчивости в режиме незамагниченных ионов и методики определения физических параметров, необходимых для классификации этой неустойчивости, из эксперимента.

**Четвёртая глава** посвящена экспериментам по инжекции плазмы поперёк магнитного поля, и описывает механизм формирования крупномасштабного «плазменного листа».

**В заключении** подведены итоги и сформулированы основные выводы.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Данные по «безграничному» разлету плотной и холодной плазмы коаксиальных ускорителей в магнитном поле, полученные с применением современной регистрирующей аппаратуры на достаточно высоком методическом уровне, представляют собой самостоятельную научную ценность. Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационного исследования, расширяют возможности лабораторной астрофизики и геофизики, в рамках которых в качестве источника плазменных струй в последние десятилетия в основном используется лазерная абляция мишеней. Ее результаты полезны для постановки лабораторных экспериментов с плазменными струями в магнитных полях, для анализа как будущих, так и уже проведенных активных экспериментов, а также для интерпретации астрономических данных.

## **Достоверность и апробация полученных результатов**

Достоверность выводов обеспечена применением совокупности независимых диагностических методов – магнитных и электрических зондов, микроволновых интерферометров, оптических и спектральных средств. Сопоставление данных, полученных различными способами, показывает их согласованность. Использование повторяемых серий экспериментов и их физическая интерпретация подтверждают корректность выводов.

По теме диссертации опубликовано 18 работ, из которых 4 статьи в рецензируемых ведущих научных журналах и 14 статей в сборниках трудов конференций и тезисов докладов на конференциях. Все вышеизложенное подтверждает обоснованность и достоверность экспериментальных результатов, представленных в диссертации Николенко А. С.

## **Личный вклад соискателя**

Работы на таком сложном экспериментальном оборудовании неизбежно выполняются в сотрудничестве с большим коллективом соавторов. Автор корректно отразил участие коллег в проведенных экспериментах, при этом отмечается, что все материалы, изложенные в диссертации, получены либо лично, либо при его непосредственном и определяющем участии.

## **Основные результаты и их оценка**

Диссертантом разработан и создан экспериментальный комплекс, включающий в себя оригинальный малогабаритный источник плазменных потоков на основе коаксиального ускорителя и широкий набор диагностических инструментов. Им установлены ключевые закономерности взаимодействия плазменных потоков с магнитным полем в режиме холловской МГД, определены характерные масштабы плазмы, скорости, проведены необходимые оценки физических величин для интерпретации проведенных экспериментов.

Эксперименты выполнены на уникальной установке «Крот», работа на которой предъявляет повышенные требования к профессионализму экспериментатора. Результаты по исследованию неустойчивостей и формированию неоднородных плазменных структур обладают высокой степенью новизны и достоверности. Работа сочетает в себе детальное описание экспериментальной базы и анализ полученных результатов, что делает её значимым вкладом в развитие направления лабораторной астрофизики и геофизики.

## **Замечания**

1. В ряде случаев иллюстративный материал мог бы быть снабжён более унифицированными подписями и шкалами, что улучшило бы восприятие данных.

2. При анализе неустойчивостей уместно смотрелось бы сопоставление результатов с современными численными моделями холловской МГД.

3. Введение краткой сводной таблицы параметров для различных серий экспериментов повысило бы наглядность материала.

4. Вызывает недоумение использование в тексте диссертации термина «плотная» плазма. Плотная по сравнению с чем? На установках инерциального УТС концентрация плазмы превышает  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

5. В работе наблюдался эффект «закручивания» желобков в сторону ионного гировращения в случае инжекции плазмы в вакуум и в фоновый нейтральный газ. Из текста диссертации не ясно, проводил ли автор проверку этих выводов, изменяя направление внешнего магнитного поля?

Указанные замечания не снижают научной ценности и общего уровня выполненного исследования.

## **Заключение**

Диссертация Николенко А. С. является завершённой научно-исследовательской работой, содержащей новые и достоверные результаты, имеющие существенное значение для развития физики плазмы, лабораторной астрофизики и геофизики. Полученные данные расширяют экспериментальную базу изучения режимов холловской магнитной гидродинамики и процессов взаимодействия плазменных струй с магнитным полем.

Работа отличается высоким научным уровнем, оригинальностью постановки задач и корректностью применения экспериментальных методик. Диссертационная работа Николенко Андрея Сергеевича «Исследование динамики импульсных плазменных струй на крупномасштабной экспериментальной установке», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 Физика

плазмы, по всем критериям отвечает требованиям положения ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата наук, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», и представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, а её автор однозначно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Выражаю согласие на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

Официальный оппонент:

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

 Крауз Вячеслав Иванович

Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный  
исследовательский центр «Курчатовский институт»

Адрес: 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

Тел.+7 (495) 196 7622; Электронный адрес: [krauz\\_vi@nrcki.ru](mailto:krauz_vi@nrcki.ru)

Подпись В.И. Крауза заверяю:

Первый заместитель главного ученого секретаря  
руководитель службы главного ученого секретаря  
НИЦ «Курчатовский институт»



 Борисов К.Е.