

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Тищенко Владимира Николаевича
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

Диссертационная работа Николенко А.С. посвящена исследованию динамики плазменных струй. Струи создаются компактными коаксиальными генераторами на эрозионном разряде и распространяются в магнитном поле. Исследования направлены на лабораторное моделирование процессов, происходящих в активных космических экспериментах и астрофизических плазменных системах.

Автор поставил и решил ряд актуальных задач, включающих:

1. изготовление источников плазменных струй на основе коаксиальных ускорителей на эрозионном разряде, а также комплекса контактных и бесконтактных диагностических средств;
2. экспериментальное изучение возмущений магнитного поля и возникающих неустойчивостей при инжекции плазменных струй вдоль магнитного поля в вакуум и фоновую плазму;
3. исследование особенностей формирования и эволюции крупномасштабного коллимированного плазменного потока при инжекции поперёк магнитного поля.

Актуальность темы. Проблема взаимодействия потока плазмы с внешним магнитным полем и фоновой средой охватывает широкий круг задач — от исследований управляемого термоядерного синтеза до физики околоземного пространства и астрофизических процессов взрывного типа. Моделирование по параметрам подобия позволяет масштабировать результаты лабораторных опытов на геофизические и астрофизические процессы, активные эксперименты в ионосфере и магнитосфере Земли. Эксперименты с коаксиальными генераторами плазмы на установке «Крот», выполненные автором, воспроизводят основные аспекты соответствующих процессов в космической и ионосферной плазме, и вносят существенный вклад в развитие лабораторной астрофизики и геофизики.

Научная новизна. В диссертации получены новые экспериментальные результаты по динамике плазменных струй, создаваемых компактными коаксиальными генераторами на эрозионном разряде, в квазиоднородном магнитном поле. Компактные коаксиальные генераторы на эрозионном разряде обеспечили высокоресурсный источник плазмы с хорошо воспроизводимыми параметрами, и позволили детально исследовать плазму с незамагниченными ионами, которая может описываться холловской магнитной гидродинамикой. Установлено, что проникновение магнитного поля в плазму происходит в режиме классической

диффузии, определяемой кулоновскими столкновениями. Это является новым режимом взаимодействия по сравнению с опытами на других установках. Экспериментально исследована неустойчивость желобкового типа в режиме сильно немагнитных ионов. Для реализованного параметра замагниченности неустойчивость исследована впервые. Получены новые данные и выводы о формировании крупномасштабного коллимированного плазменного потока («плазменного листа») при инжекции поперёк магнитного поля и об его внутренней структуре.

Характеристика и содержание 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.

Во введении диссертации обоснована актуальность направления исследований, сформулированы цели и задачи, определены методы, положения, выносимые на защиту, а также структура и объем работы.

Первая глава содержит описание экспериментальной базы и методического аппарата. Приведён обзор подходов к исследованию динамики импульсных плазменных потоков, описан крупномасштабный плазменный стенд «Крот» и коаксиальные генераторы плазменных струй на основе эрозионного разряда. Значительное внимание уделено комплексу диагностических средств: магнитным и электрическим зондовым системам, микроволновому интерферометру, ICCD-камерам с быстрым затвором, методам эмиссионной спектроскопии. Приведены характеристики плазмы, получаемой на установке, и обсуждается её соответствие лабораторному моделированию геофизических и астрофизических процессов.

Вторая глава посвящена исследованию динамики диамагнитной каверны, создаваемой при инжекции плазменной струи вдоль магнитного поля. Рассмотрены структура магнитных возмущений, распределение токов и временная эволюция каверны в вакууме и в фоновой плазме. Проведены оценки энергетических параметров плазменного потока и показано, что восстановление магнитного поля в плазме происходит в режиме классической диффузии, определяемой кулоновскими столкновениями.

Третья глава содержит результаты исследования желобковой неустойчивости на границе плазменной струи, инжектируемой вдоль магнитного поля. Представлено теоретическое обоснование наблюдаемого режима, описаны методы определения количественных характеристик неустойчивости и сопоставление экспериментальных данных с теоретическими оценками. Установлено, что выявленная неустойчивость соответствует неустойчивости Рэлея–Тейлора в режиме немагнитных ионов.

Четвёртая глава посвящена экспериментам по исследованию инжекции плазмы поперёк внешнего магнитного поля. Показано формирование крупномасштабного коллимированного плазменного потока — «плазменного листа», распространяющегося на длину более одного метра. Приведены результаты измерений плотности, скорости и магнитных возмущений, а также предложена модель

распространения плазмы в виде «плазменного конденсатора», объясняющая наблюдаемый характер движения.

В заключении обобщены основные научные результаты и сформулированы ключевые выводы работы.

Теоретическая и практическая значимость работы. Проведённые исследования имеют важное значение для развития экспериментальной базы и методов лабораторного моделирования процессов взаимодействия плазмы с магнитным полем. Они расширяют диапазон параметров, доступных в опытах. Полученные результаты могут использоваться при планировании и интерпретации активных космических экспериментов в околоземной плазме, а также при анализе астрофизических явлений, связанных с инжекцией и расширением плазмы в магнитных структурах различного масштаба. Экспериментальные данные, полученные в режиме «безграничного» разлёта плазмы с немагнитными ионами, представляют ценность для проверки и уточнения численных моделей, описывающих холловские МГД-эффекты. Кроме того, разработанные в диссертации технологии компактных коаксиальных генераторов на основе эрозионного разряда могут найти практическое применение при создании импульсных плазменных устройств — двигателей, коммутаторов, систем плазменной инжекции и других электрофизических установок.

Достоверность и апробация полученных результатов.

По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых ведущих научных журналах категории K1, а также 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.

Общая оценка и замечания по диссертации. Положения, выносимые на защиту, корректно отражают основные результаты работы и полностью соответствуют поставленным задачам. Автореферат соответствует содержанию диссертации, он объективно и полно отражает суть исследования, полученные результаты и выводы. Все результаты диссертации получены лично автором или при его непосредственном участии.

В результате проведённых исследований автором получен значительный объём новых экспериментальных данных, относящихся к динамике плазменных струй в магнитных полях в режиме холловской магнитной гидродинамики. На основе комплексного применения диагностических средств установлены основные закономерности формирования диамагнитных каверн при инжекции плазмы вдоль магнитного поля и показано, что в реализованном диапазоне параметров восстановление магнитного поля в плазме определяется процессами классической диффузии. Получены количественные характеристики возмущений магнитного поля, распределений плотности и скорости плазмы в различных режимах. Особое значение

имеют результаты по исследованию желобковой неустойчивости. Она впервые детально охарактеризована в лабораторных условиях, и достоверно обоснована ее принадлежность к типу Рэлея–Тейлора в режиме незамагниченных ионов. Показано, что данный режим реализуется в диапазоне отношения гирорадиуса ионов плазменной струи R_L к её поперечному размеру R_B : $R_L/R_B \approx 3-5$, ранее не охваченном экспериментально. Зондовыми методами изучено формирование крупномасштабного плазменного потока («плазменного листа»), движущегося за счёт электрического поля поляризации поперек внешнего магнитного поля.

Полученные результаты обладают высокой степенью новизны и представляют самостоятельную научную ценность. Работа Николенко А.С. существенно расширяет экспериментальную базу исследований в области лабораторной астрофизики и геофизики, в том числе для задач холловской МГД, а также способствует развитию методов диагностики и моделирования плазменных процессов, характерных для космических экспериментов.

По существу работы можно высказать ряд вопросов, которые, возможно, выходят за рамки решаемых в диссертации задач, но на которые хотелось бы иметь ответы.

- 1) Какую часть энергии струи уносят желобки и плазменные «листы»?
- 2) В случае поперечной инъекции плазмы – почему не уменьшается скорость струи на стадии формирования каверны и «листа»?
- 3) Каково влияние двухкомпонентного состава плазмы струи на желобки и «листы»?
- 4) Удавалось ли автору диссертации наблюдать МГД или другие волны при инъекции плазмы вдоль магнитного поля, особенно – в режиме последовательности плазменных сгустков?

Поставленные вопросы, которые могли быть отражены в работе, безусловно, не влияют на общую положительную оценку диссертации Николенко А.С. и не затрагивают её основные результаты.

Среди **достоинств** работы дополнительно отмечу следующие.

- 1) Сочетание эксперимента, методов диагностики и теории обеспечено на высоком уровне. Результаты получены с использованием разных диагностик.
- 2) Подробный обзор работ, близких к теме диссертации.
- 3) Широкие перспективы дальнейшего развития методов, основанных на применении коаксиальных генераторов струй плазмы. Например: при каких условиях не возникают желобки и «лист»? Когда при инъекции плазмы в магнитной силовой трубке генерируются МГД волны, распространяющиеся вдоль поля на расстояние много больше радиуса плазменной струи?

Заключение. 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 завершённую научно-квалификационную работу, а её автор безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Официальный оппонент, главный научный сотрудник ИЛФ СО РАН,
доктор физико-математических наук, специальность 01.04.21 – лазерная физика

Тищенко

Тищенко Владимир Николаевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН РАН)

Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б

Тел: +8-913-767-7262

Электронный адрес: tvn.25@yandex.ru

Подпись В.Н. Тищенко удостоверяю:

Ученый секретарь

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук,
кандидат физико-математических наук



Покасов П. В.

Покасов П. В.

Я, Тищенко Владимир Николаевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертационной работы Николенко Андрея Сергеевича, и их дальнейшую обработку:

Тищенко

Тищенко В.Н./