

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук
Мельникова Антона Дмитриевича
на диссертационную работу

Инжеваткиной Анны Александровны
«Поле скоростей плазмы в винтовой ловушке СМОЛА»,
представленную в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук,
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Актуальность работы:

Диссертационная работа Инжеваткиной А.А. посвящена исследованию пространственного распределения угловой и продольной скорости ионов в открытой ловушке с винтовым магнитным полем. Применение винтового магнитного поля является новым и актуальным для исследования направлением развития методов повышения удержания плазмы в открытых ловушках. В то время как развитие технологии удержания плазмы в открытых ловушках несомненно актуально в рамках глобальной задачи использования энергии термоядерного синтеза. Открытые магнитные ловушки конструкционно проще замкнутых систем типа токамак, что является важным преимуществом в практическом применении, но существует физическая проблема в повышении параметров удерживаемой плазмы. В связи с этим, актуален поиск методов повысить качество удержания плазмы.

Полученные в работе экспериментальные данные о распределении скорости плазмы являются важнейшим элементом для построения физической модели управления потоком плазмы в винтовой ловушке. Существенное внимание в работе уделяется изучению влияния параметров плазмы и магнитной конфигурации на поле скоростей, что позволяет определить оптимальный режим удержания плазмы и выявить управляемые параметры установки потенциально повышающее удержание плазмы. Кроме того, методологический базис адаптированных автором диагностических методов послужит важным звеном в дальнейших исследованиях концепции винтового удержания в открытых ловушках. Перечисленные выше обстоятельства подтверждают важность и актуальность темы диссертационной работы Инжеваткиной А.А.

Новизна подхода и основные результаты:

Научная новизна полученных автором результатов прежде всего определяется объектом исследования - открытой ловушкой с винтовой конфигурацией магнитного поля. В работе представлены экспериментальные данные, которые могут лечь в основу формирования нового научного знания об удержании плазмы. Кроме того, в работе описывается оригинальная конструкция компактного зонда Маха, представляющая интерес для широкого спектра научных задач.

Можно сформулировать отдельные результаты, явно характеризующие новизну диссертационной работы.

Предложена оригинальная конструкция зонда Маха, в котором используются плоские электроды из молибдена напыленного на кварцевую пластинку. Такой подход, повышает устойчивость зонда к высоким тепловым нагрузкам в плазме, при этом оставляет минимальными габариты зонда. С помощью разработанного зонда впервые зарегистрирован поток обратных частиц, формируемый из-за влияния винтового магнитного поля.

Получены новые результаты о влиянии таких параметров экспериментальной установки как поток газа нейтральных частиц, напряжение между катодом и анодом источника плазмы, потенциал электродов, принимающих поток плазмы и конфигурация магнитного поля на поле скоростей ионов плазмы. Сделаны выводы о влиянии параметров плазмы и установлено, что на угловую скорость влияет в первую очередь плотность плазмы.

Впервые продемонстрировано, в каких условиях винтовая конфигурация магнитного поля позволяет уменьшить потоковую скорость плазмы эффективнее, чем осесимметричная многопробочная конфигурация магнитного поля.

Достоверность полученных результатов:

Исследование пространственного распределения скорости ионов плазмы произведено с использованием нескольких общепринятых методов диагностики плазмы и современного измерительного оборудования, что обеспечивает высокую надежность измерений. Достоверность полученных результатов подтверждается согласованностью измерений проведенных независимыми методиками и их воспроизводимостью. В тексте диссертации подробно и прозрачно описаны оптическая и зондовая диагностики, алгоритмы обработки полученных данных и калибровка методов. В совокупности

описанное выше позволяет оценить методологию представленного научного исследования и сделать вывод о несомненной достоверности полученных результатов.

Результаты исследований, описанных в диссертационной работе, докладывались на 7 международных конференциях и представлены в 3 научных статьях в международных журналах (в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России или приравненных к нему). Кроме того, соискателем получен 1 патент на изобретение.

Практическая значимость полученных автором результатов:

Практическая значимость диссертации не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при строительстве винтовых модулей открытой ловушки следующих поколений. Предложенная соискателем конструкция зонда Маха может быть использована для исследования потоковых скоростей плазмы в широком классе плазменных систем.

Теоретическая значимость полученных автором результатов:

Концепция винтового удержания плазмы является новой и модель физических процессов активно строится в последние годы. Полученные автором экспериментальные данные о пространственном распределении скоростей ионов плазмы послужат одной из основ для теоретического рассмотрения подобных плазменных систем.

Содержание диссертации и ее завершенность:

Диссертационная работа хорошо структурирована и логика изложения материала способствует его восприятию. Во введении диссертации автор освещает актуальность темы диссертации, четко формулирует цели и задачи исследования. Обзор современного состояния проблемы содержит ссылки на современные литературные источники и дает понимание места представляемой научной работы в рамках глобальной задачи по созданию реактора на основе открытой магнитной системы. В конце заключения автор приводит описание личного вклада в получение новых результатов. Первая глава диссертации посвящена экспериментальным условиям и режимам работы установки СМОЛА, на которой были получены научные результаты. Описана схема установки, основные параметры установки и применяемые диагностические методы. Во второй главе автор приводит подробное описание методов измерения скорости плазмы, которые применялись в рамках научного исследования. Описание методики измерений скорости ионов по доплеровскому сдвигу спектральных линий излучения плазмы содержит обоснование корректности используемых формул, оптическую схему измерений,

процедуру калибровки спектрометра и алгоритм вычисления скорости. В части, посвященной зонду Маха, автор излагает применявшуюся модель динамики ионов и обосновывает ее применение с указанием ключевых сложностей в интерпретации результатов. Соискатель приводит описание конструкции зонда Маха, а также этапов его разработки, на которых были протестированы предварительные версии зонда. В конце главы описана калибровка зонда и алгоритм расчета потоковой скорости. Третья глава диссертационной работы посвящена изложению полученных результатов исследования поля скоростей плазмы в установке СМОЛА. Представлены полученные радиальные распределения угловой и продольной скоростей ионов в плазме в зависимости от параметров установки, плазмы и конфигурации магнитного поля. Установлено, что угловая скорость в зоне удержания ограничена ионно-звуковой скоростью и величину угловой скорости можно контролировать, управляя потоком напускаемого через источник плазмы нейтрального газа. Экспериментально показано формирование обратного движения частиц вдоль оси установки в конфигурации винтового поля. Продемонстрировано, что небольшая добавка осесимметричной многопробочной гофрировки не приводит к заметным изменениям скорости плазмы. На основе полученных результатов автор делает вывод об улучшении удержания плазмы за счет влияния винтового поля. Сделанные в работы выводы и полученные научные результаты соответствуют поставленным целям и задачам исследования. Диссертационная работа является законченной научно-исследовательской работой, в которой на основе исследования поля скоростей плазмы делается важный для прикладной задачи развития систем с открытыми ловушками вывод о перспективности внедрения винтовой конфигурации магнитного поля.

Замечания и пожелания:

Диссертационная работа представляет собой структурированное и содержательное научное исследование. Вместе с тем, у оппонента имеется несколько замечаний и пожеланий:

1. При описании конструкции разработанного зонда Маха автор использует термин «электронособирающий» электрод. Использование нестандартного термина, затрудняет интерпретацию его роли, и автору стоило привести описание назначения данных электродов.
2. В работе делается вывод о том, что распределение потенциала на пластинах плазмоприемника влияет на угловую скорость вращения плазмы (стр. 78). Этот вывод кажется преждевременным, т.к. по данным таблицы 4 потенциал пластин

не задавался в данной серии экспериментов, при этом далее встречается только отдельное упоминание, что заметного изменения скорости вращения при изменении потенциала не наблюдалось. В связи с этим противоречием, кажется, что результаты эксперимента в данной части описаны недостаточно подробно.

3. В заключении отмечается, что напряжение между катодом и анодом источника плазмы не влияет на угловую скорость вращения, однако она зависит от плотности плазмы. С другой стороны, выше (рис. 51) показано, что влияние напряжения присутствует, и автор приводит кажущееся корректным объяснение, что при изменении напряжения меняется ток разряда, а, следовательно, и плотность плазмы. Имел ли в виду автор, что на скорость вращения не влияет величина потенциала катода источника плазмы?
4. Оптические измерения продольной скорости, проводимые при регистрации излучения плазмы под углом 30° к оси установки, осуществляются в предположении эквивалентности хордового и радиального распределения скорости, но это не обосновывается. Кроме того, в данном случае может быть существенным влияние неоднородности распределения угловой скорости вдоль оси установки. Стоило в тексте работы подробнее осветить влияние обозначенных факторов на результаты данных измерений или их погрешность.
5. В работе делается вывод, что использование винтовой конфигурации магнитного поля «эффективнее» осесимметричной многопробочной конфигурации. Полезным в этом ключе было бы привести количественную меру увеличения эффективности, явно отражающую масштаб улучшения в рамках глобальной задачи.

Отмеченные недостатки не являются критическими и не сказываются на общем высоком научном уровне диссертационной работы.

Оценка автореферата диссертации:

Автореферат полностью раскрывает основные положения диссертации. Замечаний к автореферату нет.

Заключение оппонента по диссертации А.А. Инжеваткиной на соискание ученой степени кандидата наук:

Диссертация Инжеваткиной Анны Александровны «Поле скоростей плазмы в винтовой ловушке СМОЛА» на соискание ученой степени кандидата физико-

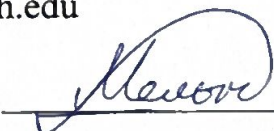
математических наук по специальности 1.3.9. «Физика плазмы» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решен ряд вопросов, касающихся физических основ создания реактора на основе открытой магнитной ловушки.

Диссертационная работа А.А. Инжеваткиной «Поле скоростей плазмы в винтовой ловушке СМОЛА» полностью соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Я, Мельников Антон Дмитриевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Инжеваткиной Анны Александровны, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
Мельников Антон Дмитриевич
Старший научный сотрудник, ОИВТ РАН,
кандидат физико-математических наук
Специальность 1.3.9 «Физика плазмы»,
адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2
тел: +7 (919) 962-57-35
эл. почта: anton.melnikov@phystech.edu

«29» мая 2026 г.

 А.Д. Мельников

Подпись А.Д. Мельникова заверяю
Ученый секретарь ОИВТ РАН



 А.Д. Киверин