

На правах рукописи



Инжеваткина Анна Александровна

**ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ ПЛАЗМЫ В ВИНТОВОЙ ЛОВУШКЕ
СМОЛА**

1.3.9. Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – кандидат физико-математических наук Судников Антон Вячеславович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ВОДОПЬЯНОВ Александр Валентинович – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», заведующий отделом физики плазмы;

МЕЛЬНИКОВ Антон Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, старший научный сотрудник;

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Защита диссертации состоится «02» июля 2026 года в «17:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «13» мая 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор РАН



Лотов Константин
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Достижения физики открытых ловушек последних десятилетий и, в частности, результаты работ в импульсных экспериментах на установках ГОЛ-3 и ГДЛ, а также опыт иностранных коллег в области нагрева плазмы и использования сверхпроводящей магнитной системы, позволяют ставить более амбициозные цели по созданию открытых ловушек реакторного класса. Найдены способы решения проблем, связанных с продольной электронной теплопроводностью и кинетическими неустойчивостями плазмы. В ИЯФ СО РАН разрабатывается проект открытой ловушки нового поколения ГДМЛ (Газодинамическая многопробочная ловушка). Физическая программа работ предусматривает интеграцию в одной экспериментальной установке нескольких способов улучшения продольного удержания плазмы, чтобы продемонстрировать возможность получения в открытой ловушке плазмы с параметрами, интересными для термоядерных приложений.

Одними из таких функциональных модулей, рассматриваемых в настоящее время, являются секции с многопробочным магнитным полем, которые должны уменьшать продольные потери частиц и энергии из центральной ловушки газодинамического типа. Привлекательным представляется динамическое многопробочное удержание, т. е. использование концевых многопробочных секций с магнитными пробками, движущимися навстречу плазменному потоку со скоростью, сравнимой с тепловой скоростью ионов.

Экспериментальная верификация винтового удержания успешно осуществляется на установке в ИЯФ СО РАН с 2017 года. Установка СМОЛА является первой системой, использующей линейные многопробочные секции с винтовой симметрией магнитного поля, позволяющие подавить продольный поток плазмы с торцов в квазистационарном режиме. В такой концепции подавление потерь плазмы с торцов установки определяется как угловой скоростью вращения, так и потоковой скоростью плазмы. Обозначенные параметры в винтовой ловушке ранее не были исследованы, что делает работу важной для изучения новой концепции винтового удержания.

В полной конфигурации магнитной системы установки было продемонстрировано улучшенное продольное удержание плазмы в винтовом магнитном поле и подавление потока более, чем в 10 раз. В концепции винтового удержания определение пространственного распределения азимутальной и продольной компонент скорости плазмы критически необходимо для построения модели управления потоком плазмы в винтовой ловушке.

Актуальной задачей становится исследование угловой скорости вращения и продольной скорости плазмы в установке СМОЛА является необходимым для определения качества улучшенного удержания при различных параметрах плазмы и магнитной конфигурации.

Степень разработанности темы исследования

Принцип винтового удержания является новой концепцией удержания плазмы в многопробочном магнитном поле, поэтому нет научного знания об азимутальной или продольной скоростях плазмы в таком режиме. На эффективность продольного удержания плазмы в винтовом магнитном поле должна влиять угловая скорость вращения. Продольная скорость движения потока истекающей и возвращенной обратно в зону удержания плазмы должна отражать, насколько сильно винтовое поле влияет на качество удержания.

Методы оптического и зондового исследований параметров плазмы широко известны и применимы в магнитных ловушках различного типа. Параметры плазмы в установке СМОЛА позволяют использовать оптические спектрометры, регистрирующие спектры в видимом диапазоне излучения, способные разрешить доплеровское уширение и сдвиг спектральной линии излучения водородной плазмы. Для определения распределения линейной скорости необходим спектрометр с пространственным разрешением для определения угловой скорости вращения.

Для измерения продольной скорости возможно использование диагностики на основе зонда Маха, способного измерить потоковую скорость в любой точке по радиусу плазменного шнура. Обычно такие типы зондов применяются в токамаках. Учитывая, что ларморовский радиус иона превышает геометрический размер зонда, классическая конструкция зонда Маха, состоящего только из штырьковых электродов не подойдет, так как не будет однозначности в измеряемом токе ионного насыщения. Однако конструкция зонда с плоскими электродами, обеспечивающая максимально точное разделение потоков ионов, летящих строго с $V_{\parallel} > 0$ и $V_{\parallel} < 0$, позволяет измерять продольную скорость и в открытой ловушках. Основное изменение конструкции заключается в том, что в качестве ионособирающего электрода используется плоский слой молибдена, напыленного на кварцевую пластинку, являющуюся одновременно и подложкой для напыления, и перегородкой для разделения двух потоков плазмы.

Цели и задачи

Целью работы является определение оптимального режима удержания плазмы посредством экспериментального и теоретического исследования

зависимостей угловой и продольной скоростей от параметров плазмы и магнитной конфигурации.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Спроектировать спектральный прибор с пространственным разрешением для регистрации доплеровского уширения и сдвига спектральной линии излучения H_{α} . Оценить вклад различных эффектов в сдвиг и уширение спектральной линии излучения H_{α} .

2. Разработать геометрию зонда Маха, позволяющую в условиях открытой ловушки регистрировать с одной стороны только поток ионов, летящих со стороны источника плазмы, с другой – обратный поток частиц, возвращающихся в зону удержания.

3. Определить азимутальную и угловую скорость вращения плазмы по доплеровскому сдвигу и ее влияние на винтовое удержание.

4. Определить потоковую скорость плазмы в транспортной секции установки СМОЛА с помощью зондовой диагностики. Продемонстрировать уменьшение продольной скорости плазмы при винтовом удержании.

5. Определить оптимальный режим работы винтового удержания в установке СМОЛА с точки зрения азимутальной и продольной скоростей плазмы. Сравнить экспериментально полученные данные потоковых скоростей в условиях осесимметричного и винтового многопробочного удержания.

Научная новизна

1. Предложен и реализован метод измерения азимутальной и продольной скоростей плазмы на основе высокоразрешающего спектрометра с высоким пространственным разрешением и зондов Маха на установке СМОЛА.

2. Экспериментально продемонстрировано, что в винтовом поле происходит подавление потока плазмы, истекающей из зоны удержания. Вблизи оси плазменного шнура за счет движения запертых ионов формируется обратный поток захваченных частиц в сторону области удержания даже в слабостолкновительном режиме.

3. Экспериментально продемонстрировано, что потоковая скорость плазмы в винтовом поле ниже, чем в осесимметричном многопробочном поле. Это свидетельствует о том, что подавление продольных потерь плазмы является эффектом не осесимметричного многопробочного, а именно винтового удержания.

Теоретическая и практическая значимость

В работе было показано, что в установке СМОЛА на эффективность продольного удержания плазмы в винтовом магнитном поле влияет угловая скорость вращения, определяемая радиальным электрическим полем. Продольная скорость движения потока истекающей и возвращенной обратно в зону удержания плазмы отражает, насколько сильно влияет винтовое поле на количество захваченных частиц, возвращаемых в зону удержания. Экспериментально продемонстрировано достижение азимутальной скорости плазмы на уровне ионно-звуковой скорости, а также обнаружен режим удержания, при котором наблюдается обратный поток захваченных частиц, движущихся посредством магнитных возмущений в винтовом магнитном поле, наблюдаемый даже при сниженной безразмерной столкновительности. Полученные знания будут использованы при строительстве винтового модуля открытой ловушки следующего поколения ГДМЛ.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы являются экспериментальные методы исследования плазмы, включая математическую обработку полученных данных, применение метода сравнения для выявления общих закономерности и различий.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Системы диагностик на основе спектрометра с пространственным разрешением и зонда Маха обеспечивают измерения угловой и продольной компоненты скорости плазмы в зоне удержания и транспортной секции установки СМОЛА. Доплеровская спектрометрия с пространственным разрешением позволяет определять скорость с точностью до 10^5 см/с при пространственном разрешении 1,2 мм. Диагностика на основе плоского зонда Маха позволяет измерять число Маха вплоть до $\sim 0,025$.

2. Угловая скорость твердотельного вращения плазмы достигает $1,1 \cdot 10^6$ с⁻¹, линейная скорость достигает $6 \cdot 10^6$ см/с, что соответствуют скорости ионного звука для параметров установки СМОЛА.

3. Продольная скорость плазмы в условиях винтовой гофрировки снижается. Вблизи оси плазменного шнура за счет движения запертых ионов формируется обратный поток захваченных частиц в сторону области удержания даже в слабостолкновительном режиме.

4. Поточковая скорость течения плазмы в винтовом поле может быть ниже, чем в осесимметричном многопробочном поле, как при средней, так и при низкой безразмерной столкновительности.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты, лежащие в основе диссертационной работы, получены с применением надлежащих теоретических и экспериментальных методов исследования. Достоверность полученных результатов подтверждена длительным использованием диагностических комплексов, методов калибровки и сравнением полученных результатов с помощью косвенных измерений этих параметров плазмы другими диагностическими системами.

Результаты исследований, лежащие в основе диссертации, лично были представлены автором на 7 международных конференциях: 12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (OS'18), Япония, г. Цукуба, 2018 г.; International Fusion and Plasma Conference & 13th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (iFPC & OS 2023), Корея, г. Пусан, 2023 г.; XLVI, XLVIII-LI Международные Звенигородские конференции по физике плазмы и УТС, Россия, г. Звенигород, 2019, 2021-2024гг.

По теме диссертации опубликовано восемь работ, из которых 2 публикации в научном журнале из списка ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации [1, 2], 1 публикация в рецензируемом научном издании, входящего в базы Scopus и Web of Science и приравненного к статьям из списка ВАК [3], и 5 в трудах конференций. Получен 1 патент на изобретение [4].

Личный вклад автора в получение научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автор лично разработал оптическую систему, позволяющую регистрировать спектральную линию излучения $\text{H}\alpha$ с пространственным разрешением [1, 2]. Автором проведена калибровка спектрометра с пространственным разрешением [1, 2]. Автором получена достоверная информация о зависимости угловой скорости вращения от параметров плазмы и магнитной конфигурации установки СМОЛА [2]. Автор лично разработал конструкции зонда Маха, проводил калибровки данного диагностического прибора, обрабатывал полученные данные, опираясь на выбранную им модель описания поведения плазмы в установке СМОЛА [3]. Автор провел исследование потоковых скоростей плазмы в многопробочном винтовом магнитном поле [3]. Автором экспериментально было установлено наличие обратного потока захваченных частиц в винтовом магнитном поле [3]. Обработка всех полученных экспериментальных данных производилась непосредственно автором [1, 2, 3]. Достоверность результатов обеспечивается несколькими способами измерения азимутальной и продольной скоростей плазмы в установке СМОЛА [2, 3]. Автором написаны соответствующие разделы в опубликованных статьях. Автором получен патент на изобретение «Устройство для регистрации скорости плазмы в открытой ловушке» [4].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения, благодарностей и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 127 страниц, включая 74 рисунков и 5 таблицы. Список литературы содержит 84 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведения исследований, определена цель, сформулированы задачи, отмечена научная новизны темы исследования, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена описанию экспериментальным условиям и режимам работы установки СМОЛА.

Схема удержания в винтовом магнитном поле должна быть по существу аналогична многопробочной, за исключением того, что возмущения магнитного поля будут эффективно двигаться в осевом направлении с управляемой скоростью V_z , определяемой следующим образом:

$$V_z \approx c \frac{hE_r}{2\pi r B_z} = \frac{\omega h}{2\pi},$$

где h – шаг винта, r – радиус плазмы, E_r – радиальное электрическое поле, B_z – магнитное поле, ω – угловая скорость вращения плазмы.

Во вращающейся системе отсчета винтовое магнитное поле выглядят как бегущие волны, распространяющиеся вдоль оси системы. Движение пробок относительно плазмы создаётся вращением плазмы в скрещенных радиальном электрическом и винтовом магнитном полях. Передача импульса между плазмой и магнитной пробкой сопровождается радиальными дрейфами и токами. Такое движение способно передавать продольный импульс от катушек магнитного поля потоку плазмы. Из-за вязкости плазмы, а также столкновений с локально запертыми частицами плазма в целом будет приобретать продольную компоненту импульса, в результате чего возникает сила, с помощью которой можно контролировать плазменные потоки: ускорять либо тормозить их. Торможение плазмы внешней силой обеспечивает лучшее продольное удержание, что делает возможным получение более высоких параметров.

Установка СМОЛА представляет собой открытую ловушку, состоящую из источника плазмы на основе накаливаемого катода LaB_6 , области удержания (входной расширитель), многопробочной винтовой секции и выходного

расширителя плазменного потока. Схема и фото показаны на рисунке 1, основные параметры плазмы – в таблице 1.

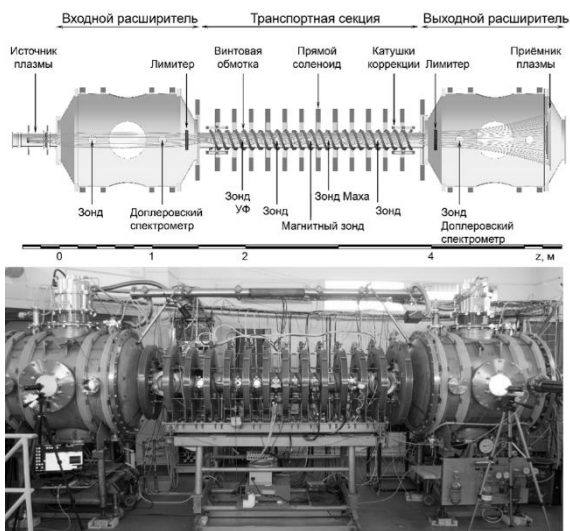


Рисунок 1 – Сверху – схема установки СМОЛА с применяемыми диагностиками, снизу – фотография во время плазменного разряда

Таблица 1 – Основные параметры установки СМОЛА

Параметры	Размерность	Величина
Плотность плазмы, n	10^{18} м^{-3}	1–10
Электронная температура, T_e	эВ	5–30
Ионная температура, T_i	эВ	2–7
Радиус плазмы, r	см	5–10
Длительность разряда, t	с	0.15–1.5
Ведущее магнитное поле в транспортной секции, B_z	мТл	до 100
Радиальное электрическое поле, E_r	В/см	5–30
Безразмерный параметр столкновительности, ν^*		0,05–1

Конфигурация магнитного поля представлена на рисунке 2 при ведущем магнитном поле в транспортной секции 70 мТл для прямого поля ($R = 1$). Здесь и далее R — отношение максимального и минимального магнитного поля на заданной силовой линии внутри транспортной секции, усредненное по сечению плазмы.

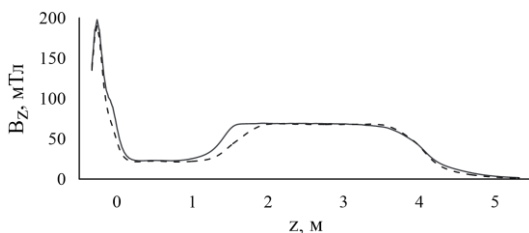


Рисунок 2 – Конфигурация магнитного поля при ведущем поле в соленоиде 70 мТл и выключенным винтовым полем: пунктирная линия – «режим с широкой струей», сплошная линия – «режим с узкой струей»

Для модели твердотельного вращения отношение E_r/r постоянно. Магнитные пробки движутся в системе отсчета плазмы противоположно потоку плазмы. В винтовом поле локальное пробочное отношение максимально на периферийных силовых линиях и уменьшается до единицы на магнитной оси. В этом случае ожидается два значительных эффекта: подавление потока на периферии плазмы с более высоким пробочным отношением вдоль линии поля и радиальное пинчевание плазмы.

Вторая глава посвящена описанию методов измерения скорости плазмы

В параграфе 2.1 приведено описание диагностики доплеровского сдвига спектральной линии излучения на основе спектрометра с высоким пространственным разрешением. Измерение скорости плазмы путем определения доплеровского сдвига спектральной линии излучения H_α осуществляется с помощью пространственно разрешающих спектрометров на базе монохроматоров МДР-12 и МДР-23. Принципиальная схема спектральных приборов приведена на рисунке 3.

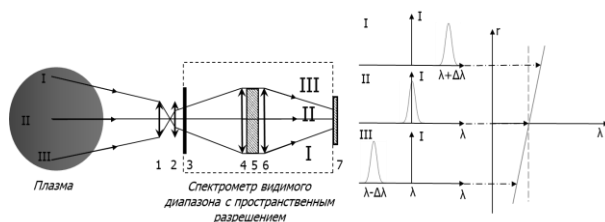


Рисунок 3 – Схема измерения скорости вращения плазмы по доплеровскому сдвигу: 1 – объектив, 2 – длиннофокусная толстая линза. Монохроматор: 3 – входная щель, 4, 6 – параболлические зеркала, 5 – дифракционная решетка. 7 – высокоскоростная ПЗС-камера

В случае твердотельного вращения доплеровский сдвиг одинаков на одной хорде наблюдения, а значит хордовое распределение излучения сопоставимо

с радиальным. Далее будем учитывать, что при твердотельном вращении координата радиуса хорды наблюдения x совпадает с радиусом плазмы r .

Определены параметры спектрального прибора: спектральное разрешение – по излучению эталонной дейтериевой лампы, пространственное разрешение – по излучению протяженной ртутной лампы, покрытой непрозрачной маской.

Спектральное разрешение спектрометра на основе МДР-23 позволило наблюдать на краю плазменного шнура в области с линейной скоростью $V_{\varphi} \approx 4 \cdot 10^6$ см/с как несмещенную, так и смещенную линии излучения H_{α} , интенсивности которых примерно одинаковы (Рисунок 4).

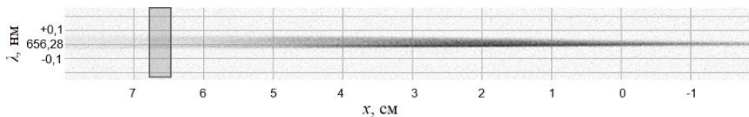


Рисунок 4 – Изображение смещенной и несмещенной спектральных линий излучения H_{α}

На рисунке 5 представлены спектры излучения дейтериевой лампы и плазмы в установке СМОЛА, проинтегрированные по координате внутри области, выделенной на рисунке 4. Наложение спектра калибровочной линии излучения дейтериевой лампы и экспериментальной демонстрирует, что один из пиков экспериментальной линии действительно отвечает несмещенной калибровочной линии H_{α} .

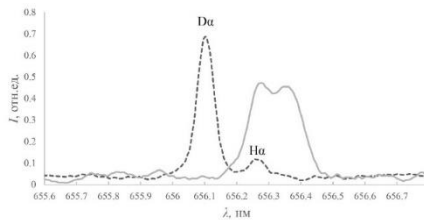


Рисунок 5 – Пунктирная линия – калибровочный спектр излучения дейтериевой лампы, сплошная линия – спектр излучения H_{α} , полученный в эксперименте и усредненный по радиусам хорд наблюдения в диапазоне от 6,5 до 7 см

В спектре свечения плазмы видна характерная особенность этой линии: на данном радиусе наблюдения явно разделяются свечение нейтрального газа на несмещенной длине волны и смещенное свечение возбужденных атомов, возникших из ионов вращающейся плазмы.

Была проведена калибровка по линиям излучения ионизированных примесей: неон, аргон, гелий, литий. Азимутальные скорости, посчитанные по доплеровскому сдвигу спектральных линий излучения различных

ионизированных примесей, совпадают с азимутальными скоростями, определенными по доплеровскому сдвигу спектральной линии излучения нейтрального водорода H_{α} , значит угловая скорость вращения, определенная по линиям излучения нейтрального водорода, соответствует угловой скорости вращения плазмы и определяется $[E \times V]$ дрейфом.

В параграфе 2.2 рассмотрены различные конструкции зонда Маха и модели, описывающие экспериментальные данные.

Для определения продольной компоненты скорости плазмы часто используется достаточно простое устройство - зонд Маха. Зондовая теория постулирует, что при наличии дрейфа частиц в потоке плазмы поток ионов к наветренной стороне зонда будет больше, чем поток ионов к подветренной стороне. Рассмотрены модели, описывающие поведение немагнитной плазмы, так как для параметров установки СМОЛА ларморовский радиус превышает размеры зонда. Для интерпретации результатов выбрана модель Хадиса-Лидского, определяющая модельный коэффициент k , зависящий от ионной и электронной температур, следующим образом:

$$k = 4 \sqrt{\frac{T_i}{T_e}}$$

На установке СМОЛА было изготовлено и использовано 4 различных конструкций зонда Маха. Наиболее правильная с точки зрения интерпретации полученных результатов представляет собой два ассиметричных двойных зонда, где ионособирающей частью является напыленный плоский молибденовый электрод, а в качестве электрособирающей поверхности выступает вольфрамовая проволока. В качестве изолирующей перегородки используется кварцевая пластинка, на которую с двух сторон напыляется электрод. Схема показана на рисунке 6. Такая форма позволяет измерять потоки, строго летящие со скоростью $V_{\parallel} > 0$ и $V_{\parallel} < 0$.

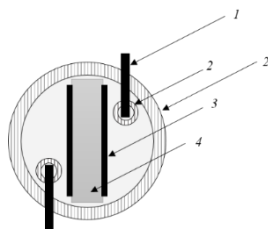


Рисунок 6 – Схема зонда Маха с комбинированными электродами: 1 – вольфрамовая проволока, 2 – керамический капилляр, 3 – напыленный молибден, 4 – кварцевая перегородка, 5 – кварцевый капилляр

Основная калибровка такого зонда заключается в определении поправочного коэффициента, возникающего из-за разных площадей собирающей поверхности. Калибровка производится путем поворота зонда на 180° и измерению токов ионного насыщения в тех же экспериментальных условиях.

В третьей главе приведены экспериментальные результаты исследования угловой и продольной скоростей плазмы в винтовой открытой ловушке.

В параграфе **3.1** показано экспериментальное исследование влияние параметров установки на угловую скорость вращения плазмы в установке СМОЛА.

Одной из первых диагностик, работающих в штатном режиме на установке СМОЛА, была доплеровская спектроскопия. В первых экспериментальных кампаниях в нестационарном режиме работы источника плазмы угловая скорость вращения была $\omega = (6 \div 8) \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$. Переход к стационарному режиму работы источника плазмы привел к понижению угловой скорости вращения до $\omega = (0,8 \div 4) \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$. Повышение газовой эффективности источника плазмы позволило увеличить электростатический потенциал, вносимый в плазму, что привело к росту угловой скорости вращения плазмы втрое и плазменного тока вдвое.

На рисунке 7 продемонстрированы наиболее выраженные изменения угловой скорости вращения были получены при варьировании плотности плазмы. Плотность регулировалась изменением потока нейтрального водорода, подаваемого в разрядную область источника плазмы (Рисунок 52), который составлял $F = (0,6 \div 4,2) \cdot 10^{20} \text{ атом/с}$. Нижняя граница данного диапазона соответствует плотности плазмы $n \approx 0,8 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$, верхняя граница – плотности $n \approx 4 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$, которые посчитаны по ВАХ зонда, установленного в координате $Z = 0,4 \text{ м}$.

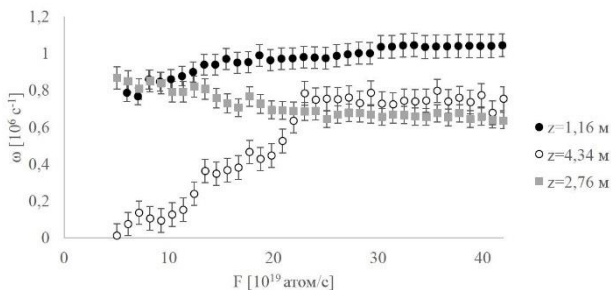


Рисунок 7 – Зависимость угловой скорости вращения плазмы от потока напускаемого газа в разрядный промежуток источника плазмы. Черные точки – $Z = 1,15 \text{ м}$, серые квадраты – $Z = 2,76$, незакрашенные точки – $Z = 4,34 \text{ м}$

Полученные зависимости угловой скорости вращения плазмы от ее параметров демонстрируют то, что в выходном расширителе изменение параметров плазмы имеет большее влияние на скорость вращения, чем вблизи источника плазмы, где угловая скорость остается практически одинаковой. Можно предположить, что в зоне удержания мы достигаем угловой скорости вращения $\omega \sim 10^6 \text{ с}^{-1}$, которая является пределом для исследованного диапазона экспериментальных параметров. При данной скорости твердотельного вращения плазмы с радиусом 6 см, максимальная линейная скорость составляет $V \approx 6 \cdot 10^6 \text{ см/с}$, соответствующей ионно-звуковой скорости на периферии плазмы. Достижение данной скорости приводит приводящей к увеличению эффективной поперечной проводимости и соответствующему снижению электрического поля в плазме.

В параграфе 3.2 показано экспериментальное исследование влияние параметров установки на потоковую скорость плазмы в установке СМОЛА.

В описываемых экспериментальных сериях была получена зависимость продольной скорости движения от глубины гофрировки магнитного поля. В винтовом поле наблюдалось превышение локальной плотности потока ионов, летящих со стороны плазмодриемника, над локальной плотностью потока ионов, летящих со стороны источника плазмы (Рисунок 8).

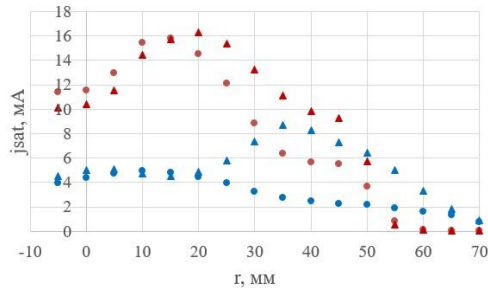


Рисунок 8 – Радиальные профили токов ионного насыщения в прямом (синий) и винтовом (красный) полях. Треугольник – навстречная сторона зонда, круг – подветренная

Радиальные профили токов ионного насыщения демонстрируют, что в транспортной секции максимум плотности достигается в окрестности радиуса плазмы $r = 30 \text{ мм}$, при этом плотность в центре плазменного шнура на треть меньше максимальной. Появление винтовой гофрировки магнитного поля приводит к повышению и смещению области более высокой плотности плазмы к центру, что подтверждает предсказанный эффект пинчевания в данной конфигурации магнитного поля. Пинчевание плазмы осуществляется путем переноса вещества с периферии к центру плазменного шнура.

Была проведена подобная экспериментальная серия при различной плотности, которая варьировалась количеством нейтрального газа, поступающего в газоразрядную область источника плазмы. На рисунке 9 представлено радиальное распределение числа Маха в зависимости от количества напускаемого газа.

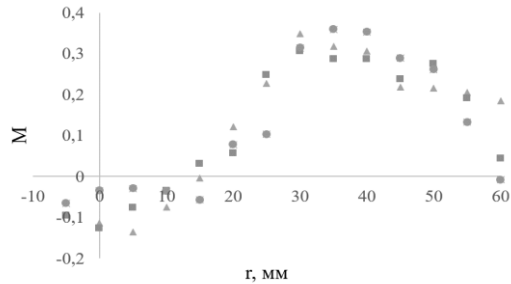


Рисунок 9 – Зависимость радиального распределения числа Маха от количества напускаемого газа в газоразрядную область источника плазмы в винтовом магнитном поле ($R = 1,34$). Круг – соответствует количеству напускаемого газа $\sim 6 \cdot 10^{19}$ атом/с, квадрат – $1,7 \cdot 10^{20}$ атом/с, треугольник $\sim 3 \cdot 10^{20}$ атом/с

В приосевой области плазменного шнура на радиусе $r = 10 - 15$ мм наблюдается обратный поток захваченных частиц даже при низкой плотности, соответствующей количеству напускаемого газа $6 \cdot 10^{19}$ атом/с. Этот экспериментально зарегистрированный факт говорит о наличии улучшенного удержания плазмы в винтовом магнитном поле даже в условиях низкой столкновительности, когда длина свободного пробега иона меньше шага винта. Для данного эксперимента доля запертых частиц на периферии плазмы составляет 8%, в центре плазмы 6%. Из соотношения фазовых пространств захваченных частиц и частиц, попадающих в конус потерь, выявлено, что при пробочном отношении $R > 1,02$ обратный поток захваченных частиц будет наблюдаться.

Была проведена экспериментальная серия, направленная на получение информации о зависимости продольной скорости движения плазмы от длины свободного пробега ионов в конфигурации винтового поля со средним по сечению пробочным отношением $R_{\text{mean}} = 1,52$.

Для демонстрации эффективности работы системы с винтовой гофрировкой по сравнению с осесимметричной многопробочной гофрировкой приведем теоретически построенные зависимости отношения потоковой скорости плазмы к тепловой ионной от безразмерной столкновительности (Рисунок 10) для разных уровней гофрировок. Число периодов гофрировки

$N=12$. Нас интересует режим многопробочного удержания, соответствующий уровню плато на этих кривых.

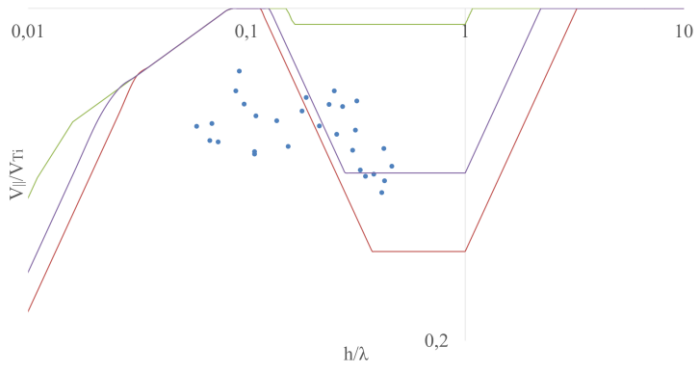


Рисунок 10 – Зависимость отношения потоковой скорости к тепловой ионной скорости от безразмерной столкновительности. Красный, фиолетовый, зеленый – теоретические зависимости для осесимметричной гофрировки при $R = 1,52$, $R = 1,43$, $R = 1,3$, соответственно, синие точки – экспериментальные данные

Экспериментально наблюдаемым фактом является то, что режим удержания плазмы в транспортной секции при уровне гофрировки винтового поля $R = 1,25$ соответствует режиму удержания в осесимметричном многопробочном поле при гофрировке $R=1,43$. Это свидетельствует о том, что при заданном количестве периодов гофрировки $N=12$ в винтовом поле плазма удерживается лучше, чем в осесимметричном многопробочном. Это означает, что использование винтовых секций в качестве одного из модулей открытой ловушки нового поколения будет эффективно.

Таким образом, было обнаружено подавление потоковой скорости плазмы в транспортной секции установки СМОЛА в винтовом магнитном поле. Был зарегистрирован обратный поток захваченных частиц в винтовом магнитном поле в конфигурации, соответствующей большому магнитному полю в области входного лимитера даже в условиях низкой столкновительности. Проведено сравнение потоковых скоростей в режимах с винтовой и осесимметричной гофрировкой магнитного поля. Определена зависимость потоковых скоростей от безразмерной столкновительности в диапазоне $v^* = 0,045 \div 0,5$. Экспериментально продемонстрировано, что с точки зрения потоковых скоростей при числе периодов гофрировки $N = 12$ винтовое поле эффективнее, чем осесимметричная гофрировка.

В Заключении представлены основные результаты представленной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках представленной работы созданы диагностики азимутальной и продольной скоростей движения плазмы на основе спектрометра с высоким пространственным разрешением и зонда Маха. Данные системы прокалиброваны и работают в штатном режиме на установке СМОЛА. Спектрометр с пространственным разрешением используется в качестве основного средства контроля профиля вращения плазмы.

В рамках проведенного исследования спроектировано 4 прототипа зондов Маха разных конфигураций, выбрана оптимальная модель устройства для регистрации потоков ионов для параметров плазмы в установке СМОЛА. Данная конструкция штатно работает в экспериментальных кампаниях. Рассмотрены различные теоретические модели интерпретации результатов для случая незамагниченной плазмы.

Выявлено, что на угловую скорость вращения плазмы не влияет величина ведущего магнитного поля или напряжение, поданное между анодом и катодом источника плазмы, но она зависит от плотности плазмы, определяемой количеством напускаемого газа. Установлены оптимальные параметры по газонапуску с точки зрения вращения. Азимутальная скорость в зоне удержания ограничивается ионно-звуковой скоростью $\sim 6 \cdot 10^6$ см/с, при этом характерная угловая скорость вращения составляет $\sim 1,1 \cdot 10$ с⁻¹.

Показано, что продольная скорость плазмы в винтовом поле ниже, чем в прямом поле. Обнаружен обратный поток захваченных частиц, движущихся посредством магнитных возмущений в винтовом магнитном поле, который наблюдался даже при сниженной плотности, что соответствует теории винтового удержания. Для существования подобного эффекта достаточно иметь 6% захваченных частиц в центре плазмы, 8% – на периферии.

Показано, что скорости, полученные путем измерения электрического поля, а также по данным спектроскопии, лежат в одном диапазоне с измеренными зондом Маха.

Экспериментально продемонстрировано, что улучшенное удержание является эффектом не многопробочной конфигурации, а влиянием именно винтового поля. Поточковая скорость течения плазмы в винтовом поле может быть ниже, чем в осесимметричном многопробочном поле, как при средней, так и при низкой безразмерной столкновительности.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях:

1. Исследование вращения плазмы в открытой винтовой ловушке СМОЛА / А.А. Инжеваткина, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов [и др.]. Текст: электронный // Физика плазмы – 2021. – Vol. 47. – № 8. – С. 706 – 715. – URL: <https://doi.org/10.31857/S0367292121080059>
2. Исследование потоковой скорости плазмы в открытой винтовой ловушке СМОЛА / А.А. Инжеваткина, И.А. Иванов, В.В. Поступаев [и др.]. Текст: электронный // Физика плазмы – 2024. – Vol. 50. – № 1. – С. 3 – 14. – URL: <https://doi.org/10.31857/S0367292124010019>
3. Doppler spectroscopy system for the plasma velocity measurements in SMOLA helical mirror / A.A. Inzhevatkina, A.V. Burdakov, I.A. Ivanov [et al.]. Текст: электронный // Plasma and Fusion Research. – 2019. – Vol. 14. – P. 2402020. – URL: <https://doi.org/10.1585/pfr.14.2402020> – Дата публикации: 12.02.2019.
4. Патент на изобретение №2833794: Российская Федерация. Н05Н1/00 (2024.08). Устройство для регистрации скорости плазмы в открытой ловушке: № 2024119794: заявл: 15.07.2024; опубл: 28.01.2025 / Инжеваткина А.А.; заявитель ИЯФ СО РАН. – 8 с. – Текст: непосредственный

В сборниках трудов конференций:

1. Инжеваткина, А. А. Диагностика пространственного распределения скорости плазмы в винтовой открытой ловушке СМОЛА / А.А. Инжеваткина, Бурдаков А.В., Судников А.В. [и др]. Текст: непосредственный // XLVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: сборник тезисов докладов. – Москва: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН». – 2019. – С. 75.
2. Инжеваткина, А. А. Зависимость скорости вращения от параметров плазмы в открытой винтовой ловушке СМОЛА / А.А. Инжеваткина, Судников А.В., Бурдаков А.В. [и др]. Текст: электронный // XLVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: сборник тезисов докладов. – Москва: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН». – 2021. – С. 64. – URL: <https://doi.org/10.34854/ICPAF.2021.48.1.032>
3. Инжеваткина, А. А. Поле скоростей течения плазмы в режиме удержания и ускорения в винтовой открытой ловушке СМОЛА / А.А. Инжеваткина, Судников А.В., Иванов И.А. [и др]. Текст: электронный // XLIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: сборник тезисов докладов. – Москва: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН». – 2022. – С. 88. – URL: <https://doi.org/10.34854/ICPAF.2022.49.1.055>

4. Инжеваткина, А. А. Динамика движения плазмы в открытой винтовой ловушке СМОЛА / А.А. Инжеваткина, Судников А.В., Иванов И.А. [и др]. Текст: электронный // L Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: сборник тезисов докладов. – Москва: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН». – 2023. – С. 94. – URL: <https://doi.org/10.34854/ICPAF.2023.50.2023.1.1.050>

5. Инжеваткина, А. А. Скорости течения плазмы в многопробочном и винтовом магнитном полях в открытой винтовой ловушке СМОЛА / А.А. Инжеваткина, Судников А.В., Толкачев М.С. [и др]. Текст: электронный // LI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу: сборник тезисов докладов. – Москва: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН». – 2024. – С. 77. – URL: <https://doi.org/10.34854/ICPAF.51.2024.1.1.039>

Инжеваткина Анна Александровна

Поле скоростей плазмы в винтовой ловушке СМОЛА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 29.04.2026.
Подписано в печать 30.04.2026.
Формат 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 9

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11