

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора

ФТИ им. А. Ф. Иоффе,

доктор физико-математических наук

П.Н. Брунков

» июня 2026 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации Инжеваткиной Анны Александровны на тему «Поле скоростей плазмы в винтовой ловушке СМОЛА», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Диссертация Инжеваткиной А.А. посвящена экспериментальному исследованию винтового удержания/ускорения плазмы в открытой многопробочной ловушке СМОЛА, оборудованной секцией с винтовой обмоткой. В диссертационной работе с помощью оптических и зондовых методов осуществлены измерения азимутальных и продольных скоростей плазменных потоков, проанализированы радиальные зависимости азимутальных скоростей, исследовано влияние винтовой и осесимметричной гофрировок на продольную скорость, а также зависимость потоковой скорости от длины свободного пробега.

Актуальность диссертационной работы Инжеваткиной А.А. обусловлена перспективами создания реакторов термоядерного синтеза на основе магнитных ловушек с незамкнутыми конфигурациями силовых линий, позволяющими удерживать плазму с высоким бета – отношением давления плазмы к давлению магнитного поля. Предложенные в последнее время усовершенствования концепции магнитного удержания в открытых ловушках, такие как диамагнитное удержание, устройство винтовых многопробочных концевых секций для снижения продольных потерь, позволяют надеяться на достижение в них условий, необходимых для реализации безнейтронных термоядерных реакций. Рассматриваемое диссертационное исследование направлено на оценку перспективности применения винтовых многопробочных секций в термоядерных реакторах будущего. Результаты этой работы уже в ближайшем будущем могут быть применены при проектировании и сооружении установки ГДМЛ (Газодинамическая многопробочная ловушка) в ИЯФ СО РАН.

Научная новизна диссертационной работы состоит в экспериментальной демонстрации снижения продольной скорости плазмы, а также образования обратного потока частиц в область удержания при использовании винтового магнитного поля в

многопробочной ловушке СМОЛА. Кроме того, следует отметить разработку усовершенствованной конструкции зонда Маха, позволившей прямые измерения скорости потока частиц в плазме транспортной секции.

Практическая значимость исследования состоит в разработке и создании диагностического комплекса для измерения азимутальных и продольных скоростей в открытой ловушке с винтовой секцией. Комплекс включает в себя оптическую диагностику доплеровских сдвигов спектральных линий водорода и примесей, а также зонды Маха, работающие в режиме незамагниченных ионов. Разработанные диагностические устройства найдут свое применение при продолжении программы на установке СМОЛА и при разработке и сооружении открытых ловушек следующего поколения. Накопленный опыт измерения скоростей плазмы будет полезен и для планирования экспериментов на тороидальных установках с магнитным удержанием.

Диссертация состоит из Введения, 3 Глав и Заключения. Содержит 127 страниц, 74 рисунка, 5 таблиц, список цитированной литературы из 84 наименований.

Во Введении приведен краткий обзор современного состояния исследований нагрева и удержания плазмы в открытых ловушках и перспективы их использования для производства энергии. Сформулированы основные трудности на пути реализации проектов реактора на основе концепции ловушек с незамкнутыми линиями магнитного поля и описаны возможности их преодоления (устройство многопробочных ловушек, подавление неустойчивостей азимутальным вращением, дополнительный нагрев электронов, многопробочное винтовое удержание). На основании обзора современного состояния исследований во Введении сформулирована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи.

Также, во Введении приведены сведения об апробации работы на научных конференциях – 7 докладов на международных конференциях, перечислены публикации в научных журналах – 2 публикации в журнале из списка ВАК и 1 в журнале, входящем в международные базы публикаций Web of Science и Scopus, патент на изобретение «Устройства для регистрации скорости плазмы в открытой ловушке».

В Главе 1 представлены экспериментальные условия и режимы работы установки СМОЛА, описан принцип работы и устройство ловушки, состав и расположение диагностических устройств. Приведены технические и физические параметры установки.

В Главе 2 детально описано устройство оптической и зондовой диагностик, являвшихся основными инструментами для получения сведений о величине и пространственных распределениях азимутальных и продольных скоростей. Описаны спектрометры МДР-12, МДР-23 и ThorLabs CCS100 Compact Spectrometer, а также видео-

камера ПЗС SDU-285 (матрица SONY ICX285AL), использовавшиеся в экспериментах, процедуры их калибровки, методики определения скорости вращения, ионной температуры и их пространственных распределений. Приведены полученные в экспериментах величины $T_i(r)$, $V_\varphi(r)$.

Также, в Главе 2 описаны 4 конструкции зондов Маха, последовательно использовавшиеся в экспериментах, методы их калибровки, получаемые с их помощью данные о скорости продольных потоков и азимутальных скоростях вращения. Проведено их сравнение с данными, полученными эмиссионными зондами в предположении о равенстве азимутальной скорости V_φ и скорости дрейфа в скрещенных радиальном электрическом и ведущем магнитном полях. Сравнение показало хорошее согласие данных двух использованных методик.

В Главе 3 представлены основные результаты выполненного экспериментального исследования. При работе ловушки в конфигурации без транспортной секции и выходного расширителя обнаружено увеличение угловой скорости вращения плазмы с ростом амплитуды магнитного поля, объясняемое влиянием размера области контакта с вакуумной камерой на распределение потенциала внутри плазмы. В полной конфигурации установки, включающей транспортную секцию и выходной расширитель, обнаружено существование области ($r \leq 3$ см при полном радиусе плазмы ~ 7 см) постоянной по радиусу угловой скорости вращения $\omega(r)$ – так называемое «твердотельное» вращение. При переходе от режима удержания к режиму ускорения приращение угловой скорости, обусловленное включением винтовой обмотки, оказалось в 3-4 раза больше. В стационарном режиме работы ловушки при оптимизированном напуске рабочего газа угловая скорость вращения остается постоянной в течение всего разряда, при этом величина ω на входе в транспортную секцию вдвое превышает ее величину на выходе: $\sim 1 \cdot 10^6$ с⁻¹ и $\sim 0,5 \cdot 10^6$ с⁻¹, соответственно. При увеличении плотности плазмы за счет дополнительного напуска газа ω растет до $(0,8 - 1,0) \cdot 10^6$ с⁻¹ на входе и выходе транспортной секции и понижается до $0,7 \cdot 10^6$ с⁻¹ в центральной области, что свидетельствует о продольной неоднородности угловой скорости вращения. С помощью спектроскопических и зондовых измерений в области удержания измерены следующие параметры плазмы в ловушке СМОЛА: $T_e = 30$ эВ, $T_i = 4$ эВ, $n_i = 2 \cdot 10^{18}$ м⁻³ при магнитной индукции $B = 20$ мТл, что позволило оценить тепловую скорость электронов – $V_{Te} \approx 2 \cdot 10^6$ м/с, тепловую скорость ионов – $V_{Ti} \approx 2 \cdot 10^4$ м/с, ионно-звуковую скорость – $C_s \approx 6 \cdot 10^4$ м/с, альфвеновскую скорость – $V_A \approx 3 \cdot 10^5$ м/с. На основании полученных оценок сделан вывод об ограничении наблюдаемых азимутальных скоростей вращения величиной ионно-звуковой скорости.

С помощью зондов Маха измерена зависимость продольной скорости от величины гофрировки в транспортной секции. При измерениях ионных токов насыщения зарегистрировано уменьшение продольной скорости при включенном винтовом магнитном поле. При этом в центральной области ($r < 1$ см) обнаружено обращение продольной скорости плазмы, которое интерпретировано как движение захваченных винтовым полем частиц в направлении входного расширителя (область удержания). Также обнаружено, что скорость течения плазмы оказывается ниже в винтовом магнитном поле в сравнении с осесимметричной многопробочной конфигурацией, в которой скорость падает до нуля. В условиях комбинированной винтовой и многопробочной гофрировки был обнаружен обратный поток захваченных частиц, возвращающихся в зону удержания в центральной области, при этом в конфигурации осесимметричной гофрировки поток частиц в обратном направлении не зарегистрирован. Также, с использованием зонда Маха была исследована зависимость скорости движения плазмы от длины свободного пробега ионов. Обнаружено, что при величине параметра столкновительности ν^* , характеризуемого отношением характерной длины гофрировки h к ионной длине свободного пробега λ , определяемой кулоновскими соударениями, превышающей 0,4, число Маха в винтовом поле в 1,5 раза ниже, чем в осесимметричном поле.

В Заключение приведены основные результаты выполненного исследования.

Рассматриваемая диссертационная работа включает в себя большой объем экспериментальных данных, полученных с помощью оптических и зондовых измерений. На основании этих данных сделан вывод о заметном положительном влиянии винтового магнитного поля на удержание плазмы в открытой ловушке СМОЛА, оборудованной транспортной секцией с комбинированной многопробочной и винтовой магнитными катушками. К числу достоинств работы следует отнести высокий уровень экспериментальной техники, разработанной и использованной при выполнении исследования, а также применение двух независимых методов для измерения скоростей плазменных потоков в ловушке, что значительно повышает уровень достоверности выводов работы.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. При обсуждении происхождения излучения нейтрального водорода на длине волны спектральной линии H_α и на смещенных линиях упомянуты механизмы возникновения нейтральных атомов в результате диссоциации холодных молекул водорода и рекомбинации ионов, стр. 32 текста диссертации. Однако, при характерных параметрах плазмы в системах с магнитным удержанием доминирующим процессом возникновения быстрых атомов является не

- рекомбинация, а перезарядка ионов на холодном остаточном газе, которая не упоминается в качестве источника ускоренного нейтрального водорода.
2. В диссертации имеется единственный рисунок, характеризующий измеренное поведение ионной температуры при наличии и в отсутствие винтового магнитного поля, – рис.21, стр. 44. На этом рисунке T_i в винтовом поле оказывается меньше, чем в его отсутствие. К сожалению, в тексте диссертации не обсуждается вопрос о том почему, несмотря на улучшение удержания при наличии винтового поля, ионная температура в этом режиме оказывается ниже, чем в прямом поле.
 3. При определении угловой скорости вращения и ионной температуры плазмы по спектрам излучения водорода для выделения части спектра, по которой определяется доплеровский сдвиг и доплеровское уширение линии, рисунки 17-19, стр.39-42 использована процедура «вычитания калибровочного распределения интенсивности $I_{cal}(\lambda)$ » вместо традиционного решения интегрального уравнения для свертки измеренного спектра и калибровочного(аппаратного). В диссертации отсутствуют оценки возможных ошибок, вносимых упрощением процедуры обработки экспериментальных спектров.
 4. В диссертационной работе имеются многочисленные недочеты оформления. Например: многократно упомянуты режимы работы ловушки «с широкой струей» и «с узкой струей» (рис.6, 8, 9, 10, 64, стр.91, 95, 97, 99, 101, 102), которые нигде не определены и не описаны в тексте диссертации; на рис.38 – отсутствуют расшифровки обозначений; на рис.40 – не обозначено что изображено крестиками и кружками; стр.57, 58, 66, 67 – без определения используется необщепринятый термин «преслой»; стр.77, 3 строка – ссылка на отсутствующий рисунок 44(с); стр.84, 8 строка снизу – дана ссылка на рис.31 вместо рис.51 и другие недочеты.

Перечисленные выше замечания не препятствуют положительной оценке диссертации в целом. Диссертация «Поле скоростей плазмы в винтовой ловушке СМОЛА» Инжеваткиной Анны Александровны, представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой. Работа прошла апробацию, ее результаты докладывались на 7-ми международных конференциях и опубликованы в 3 научных статьях (2 в журнале Физика плазмы, входящем в перечень ВАК, и одна в журнале Plasma and Fusion Research, индексируемом в базах публикаций Web of Science и Scopus и приравненного к статьям из перечня ВАК). Также материалы диссертации опубликованы в 5 сборниках трудов конференций. Имеется патент РФ на изобретение «Устройство для регистрации скорости плазмы в открытой ловушке».

Автореферат и публикации по теме исследований достаточно полно отражают основное содержание диссертации.

По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов представленная диссертация соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Инжеваткина Анна Александровна, достойна присуждения искомой степени по специальности 1.3.9. – Физика плазмы.

Отзыв подготовил

Лебедев Сергей Владимирович,

доктор физико-математических наук, специальность Физика и химия плазмы – 01.04.08, ученое звание – старший научный сотрудник,

должность – главный научный сотрудник лаб. Методов нагрева и генерации тока плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе),

Почтовый адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26,

Гл. науч. сотр. лаб. Методов нагрева и генерации тока плазмы,

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

доктор физико-математических наук



С.В. Лебедев

Доклад по материалам диссертации заслушан на заседании научного семинара лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им А.Ф. Иоффе 22 мая 2026 г.

Настоящий отзыв заслушан и утвержден на заседании научного семинара лаборатории Физики высокотемпературной плазмы ФТИ им А.Ф. Иоффе 05 июня 2026 г.

Зав. лаб. Физики высокотемпературной плазмы

ФТИ им. А.Ф. Иоффе,

доктор физико-математических наук, проф.



Е.З. Гусаков