

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Инжеваткиной Анны Александровны
“Поле скоростей плазмы в винтовой ловушке СМОЛА”,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.9. - Физика плазмы

Управляемый термоядерный синтез (УТС) сохраняет статус одного из наиболее привлекательных источников чистой энергии, способного в долгосрочной перспективе удовлетворить глобальный спрос. Принципиально обеспечивая практически неисчерпаемый энергоресурс с минимальным радиоактивным следом, УТС выступает важнейшим инструментом в стратегии декарбонизации мировой энергетики. На протяжении последних десятилетий мировое научное сообщество активно концентрирует усилия на разработке систем с замкнутым магнитным удержанием, что подтверждается такими проектами, как ITER и DEMO. Российская Федерация также вносит значительный вклад в данное направление, проводя собственные исследования по реализации потенциала управляемого синтеза. Параллельно развивается концепция открытых магнитных ловушек (ГДЛ, ГОЛ-3), отличительной особенностью которых является способность удерживать плазму при высоком отношении давления плазмы к магнитному давлению (достигающего единицы), что делает их уникальными для изучения физики плазмы в экстремальных режимах.

Диссертационная работа Инжеваткиной А.А. посвящена экспериментальному исследованию полей скоростей плазмы в открытой винтовой ловушке СМОЛА. Актуальность темы обусловлена необходимостью поиска эффективных методов продольного удержания плазмы в линейных магнитных ловушках, которые рассматриваются как перспективная альтернатива токамакам для термоядерных реакторов. Предложенная в ИЯФ СО РАН концепция винтового удержания, где вращающаяся плазма взаимодействует с винтовым магнитным полем, создающим бегущие пробки, требует детальной экспериментальной верификации. Определение пространственного распределения азимутальной и продольной компонент скорости плазмы является критически важным для построения модели управления плазменным потоком в такой ловушке. Работа выполнена на уникальной экспериментальной установке, и её результаты имеют прямое значение для проектирования открытых ловушек нового поколения (например, ГДМЛ). Таким образом, тематика диссертационной работы Инжеваткиной Анны Александровны, посвященная указанным вопросам, представляется весьма важной и актуальной. Несомненно, что тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Достоверность полученных результатов обеспечивается комплексным применением двух независимых диагностических методов (доплеровская спектроскопия с пространственным разрешением и зонд Маха), результаты которых согласуются между собой. Тщательная калибровка спектрометров по эталонным источникам (дейтериевая, ртутная лампы) и зондов обеспечивает высокую точность измерений. Воспроизводимость результатов в ходе многолетних экспериментальных кампаний (2019–2024 гг.) и их апробация на российских и международных конференциях дополнительно подтверждают достоверность работы.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем. 1. Предложен и реализован оригинальный метод одновременного измерения азимутальной и продольной скоростей плазмы на основе высокоразрешающего спектрометра с пространственным разрешением и плоского асимметричного зонда Маха в условиях открытой ловушки СМОЛА. Продемонстрирована возможность измерения скорости с хорошей точностью. 2. Экспериментально обнаружен обратный поток захваченных ионов в сторону области удержания при включении винтового магнитного поля. Данный эффект наблюдается даже в слабостолкновительном режиме, что подтверждает наличие улучшенного удержания плазмы за счёт бегущих винтовых возмущений. 3. Показано, что потоковая скорость плазмы в винтовом магнитном поле ниже, чем в осесимметричном многопробочном поле при одинаковом среднем пробочном отношении. Установлено, что улучшенное удержание является эффектом именно винтовой гофрировки (бегущих возмущений), а не статической многопробочной конфигурации.

Диссертация состоит из Введения, трех глав, Заключения, и Списка цитируемой литературы (84 наименования). Общий объём – 127 страниц, включая 74 рисунка и 5 таблиц. А вот отдельного списка публикаций автора по теме диссертации нет, что затрудняет работу с текстом – это можно отнести к недостаткам диссертации.

Остановимся кратко на анализе основных результатов диссертации, следуя ее тексту.

В первой главе представлено описание установки СМОЛА, её магнитных конфигураций (прямое поле, винтовое поле, осесимметричная гофрировка) и диагностического комплекса. Приведены типичные параметры плазмы: плотность $n = (1 \div 10) \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$, электронная температура $T_e = 5 \div 30 \text{ эВ}$, ионная температура $T_i = 2 \div 7 \text{ эВ}$.

Вторая глава посвящена двум ключевым диагностикам. Для доплеровской спектроскопии подробно описан принцип работы, калибровка (линейная дисперсия, аппаратная функция, пространственное разрешение), методика вычитания несмещённой линии и обработка данных. Для зонда Маха рассмотрены различные теоретические модели, описана эволюция конструкций (от проволочных электродов к плоским напыленным молибденовым пластинам), приведена калибровка.

Третья глава содержит основные экспериментальные результаты. Исследована зависимость угловой скорости вращения от параметров плазмы (поток газа, напряжение на источнике, магнитное поле и др.). Показано, что угловая скорость достигает максимума при оптимизации газовой эффективности источника. Исследована продольная скорость, показано, что формируется обратный поток. Сравнение режимов с осесимметричной и винтовой гофрировкой однозначно показывает, что улучшенное удержание связано именно с винтовым полем.

Логика построения работы последовательна, каждая глава завершается выводами, соответствующими поставленным задачам.

В целом диссертация Инжеваткиной Анны Александровны является законченной научно-исследовательской работой, в которой с единой точки зрения решен значительный круг задач физики плазмы, имеющих важное научное и практическое значение для современной науки.

Диссертационная работа не имеет существенных недостатков, однако, как и по отношению ко всякой достаточно объемной и серьезной работе, по содержанию и оформлению диссертации можно сделать ряд замечаний.

1. Одним из способов измерения скорости плазмы является измерение доплеровского смещения линии H_{α} . В диссертации недостаточно подробно обосновано то, что движение атомарного водорода и движение плазмы как целого это одно и то же.

2. Похожий вопрос вызывает и измерение ионной температуры по уширению линии излучения атомарного водорода. Необходимо подробнее обосновать связь температуры ионов и температуры атомов.

3. Стр. 49. Не указано соотношение примесного газа и водорода.

4. На стр. 25 и 26 не указано каким способом измерялось пространственное распределение электрического поля и плотности плазмы.

5. Стр. 93. Не верно использован термин «низкая столкновительность».

Несмотря на отмеченные недостатки, общее впечатление от диссертации весьма благоприятное. Созданы уникальные системы диагностики и с их помощью получены важные научные результаты.

Инжеваткина Анна Александровна безусловно является высококвалифицированным специалистом в области экспериментальной физики плазмы. Основные результаты диссертации опубликованы в высокоцитируемых научных изданиях, неоднократно докладывались на конференциях, в том числе и международных, и хорошо известны специалистам.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Инжеваткиной Анны Александровны «Поле скоростей плазмы в винтовой ловушке СМОЛА» полностью удовлетворяет требованиям пунктов 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации Инжеваткина Анна Александровна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Официальный оппонент Водопьянов Александр Валентинович, заведующий отделом физики плазмы Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», доктор физико-математических наук (01.04.08 «Физика плазмы»), доцент по специальности «Физика плазмы», адрес: Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46, e-mail: avod@ipfran.ru

02 июня 2026 г.



Подпись А.В. Водопьянова удостоверяю.

Ученый секретарь ИПФРАН к.ф.-м.н.  / Корюкин Игорь Валерьевич/

02 июня 2026 г.

