

Конкурс Молодых Ученых ИЯФ СО РАН

Физика плазмы

16 Мая 2023 года

Сборник тезисов

Председатель: Судников Антон Вячеславович

Секретари: Шмигельский Евгений Анатольевич
Сандалов Евгений Сергеевич

Новосибирск – 2023

Содержание

- 1 Воинцев Вадим Александрович – Анализ и оптимизация высокочастотных плазменных драйверов с различными охлаждаемыми защитными экранами 3
- 2 Гамов Вячеслав Валерьевич – Особенности формирования мощных ионных пучков в нейтральных инжекторах при изменении атомной массы частиц 4
- 3 Гороховский Ринат Геннадьевич – Исследование динамики популяции быстрых ионов в плазме на установке ГОЛ-NB 6
- 4 Ильенко Никита Сергеевич – Модернизация ИОС источника отрицательных ионов водорода для прототипа инжектора высокоэнергетичных нейтралов 8
- 5 Инжеваткина Анна Александровна – Продольные и азимутальные скорости плазмы в винтовой ловушке СМОЛА 9
- 6 Кардаш Данил Юрьевич – Устойчивость поверхностных дрейфовых волн в диамагнитной ловушке 11
- 7 Колесниченко Константин Сергеевич – Измерение радиального распределения плотности и электронной температуры мишенной плазмы на установке КОТ 12
- 8 Константинов Сергей Евгеньевич – Моделирование баллонной моды в линейной системе с проводящими торцами 13
- 9 Рыжков Георгий Андреевич – Подготовка к исследованию возможностей применения высокотемпературных керамических материалов для покрытия первой стенки термоядерных реакторов 14
- 10 Христо Михаил Сергеевич – Равновесие плазмы в режиме диамагнитного удержания в открытой ловушке с инжекцией высокоэнергичных атомов 15
- 11 Худяков Вадим Константинович – Динамика ионов в сильно-нелинейной кильватерной волне 17
- 12 Черепанов Дмитрий Евгеньевич – In situ исследование эрозии поверхности высокотемпературных керамик в результате импульсного нагрева, возможного в термоядерных установках при магнитном удержании плазмы 18
- 13 Шмигельский Евгений Анатольевич – Эксперименты по удержанию плазмы на ГДЛ в магнитных конфигурациях со сближенными точками останова 19

1 Анализ и оптимизация высокочастотных плазменных драйверов с различными охлаждаемыми защитными экранами

¹Воинцев Вадим Александрович

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

v.vointsev@alumni.nsu.ru

Научный руководитель: к. ф.-м. н. Шиховцев Игорь Владимирович

Подразделение: Лаборатория 9-0

Статус: 1-й курс аспирантуры

Текущее образовательное учреждение: ИЯФ СО РАН

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера в Лаборатории 9-0 разрабатывается инжектор пучка атомов водорода высокой энергии для нагрева плазмы, основанный на ускорении и нейтрализации пучка отрицательных ионов водорода. В качестве источников плазмы в данном инжекторе используются высокочастотные (ВЧ) драйверы, представляющие собой цилиндрические камеры диаметром 200 мм, боковая поверхность которых изготовлена из керамики, вокруг которой намотана трех-витковая антенна.

Одной из основных проблем ВЧ драйверов, ограничивающих длительность импульсов, является нагрев компонентов – в особенности, керамической стенки. Для защиты керамики от плазмы внутри драйверов установлены водоохлаждаемые защитные фарадеевские экраны с продольными щелями. Недостатком экранов является уменьшение эффективности передачи мощности плазме. Основными задачами данной работы являлись исследование и сравнение ВЧ драйверов с различными защитными экранами, а также оптимизация работы драйвера.

Тестирования ВЧ драйверов проводились на специальном испытательном стенде, оснащенном диагностикой для измерения плотности ионного тока, мощности нагрева и температуры компонентов драйвера. Измерения плотности тока проводились при помощи сеточного зонда. Для измерения температуры компонентов драйвера использовался тепловизор. Для оценки потерь использовались данные измерений температуры и потока охлаждающей воды, а также результаты моделирования нагрева экрана. С целью улучшения эффективности генерации плазмы и увеличения плотности тока в данной работе были также рассмотрены различные конфигурации антенны.

В докладе предоставлены результаты экспериментов на стенде и результаты моделирования нагрева экрана.

2 Особенности формирования мощных ионных пучков в нейтральных инжекторах при изменении атомной массы частиц

^{1,2}Гамов Вячеслав Валерьевич

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, Россия*

slavagamovsolo1999@mail.ru

Научный руководитель: к. ф.-м. н., с. н. с. Сорокин Алексей Валерьевич

Подразделение: Лаборатория 9-0

Статус: 2-й курс магистратуры

Текущее образовательное учреждение: НГТУ

Важнейшей задачей в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу является задача нагрева плазмы до температур, необходимых для осуществления ядерного синтеза. Нагрев плазмы – это ввод энергии в плазму с помощью внешних источников с целью достижения необходимых для реакции ядерного синтеза температур. Наиболее эффективным методом нагрева в настоящее время считается инжекция в плазму пучка нейтральных атомов.

Выпускная квалификационная диссертация посвящена измерению геометрических характеристик пучков (угловой расходимости и фокусного расстояния) инжектора нейтральных атомов водорода и дейтерия и изучению переходных процессов, происходящих при изменении атомной массы рабочего газа инжектора. Инжектор предназначен для нагрева плазмы в газодинамической ловушке (ГДЛ).

Для выполнения поставленной задачи проводился ряд экспериментов на инжекторе, описание и характеристики которого представлены диссертации. Также в теоретической части данной диссертационной работы описан общий принцип работы этого инжектора.

Актуальность данной диссертации связана с необходимостью обеспечить большую мощность инжекции при сравнительно низкой энергии $15 \div 50$ кэВ пучка для нагрева плазмы в современных открытых ловушках и сферических токамаках. Для этого необходимо создать инжекторы с большой величиной тока пучка, 150 А и более. Для успешной транспортировки пучков большой мощности в плазму требуется разработать системы формирования пучков с фокусировкой и предельно низкой угловой расходимостью. Такие атомарные инжекторы для установок УТС с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы отсутствуют в настоящее время.

- [1] Семашко Н.Н., Владимиров А.Н., Кузнецов В.В., Кулыгин В.М., Панасенков А.А. Инжекторы быстрых атомов водорода. - М.: Энергоиздат, 1981. - 168 с.
- [2] Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 248 с.
- [3] Кузьмичёв А.И., Бабинов Н.А., Лисенков А.А. Плазменные эмиттеры источников заряженных и нейтральных частиц. - Киев: Аверс, 2016. - 181 с.

- [4] А.Т. Форрестер. Интенсивные ионные пучки / Пер. с англ. под ред. Н.Н. Семашко. – М.: Мир, 1992. – 358 с.
- [5] =3
- [6] Габович М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов. – М.: Атомиздат, 1972. – 303 с.
- [7] Я. Браун и др. Физика и технология источников ионов / Пер. с англ. под ред. Е.С. Машковой. – М.: Мир, 1998. – 496 с.
- [8] Мамедов Н.В. Физические основы генерации ионных пучков в плазменных источниках нейтронных трубок: Учебное пособие. - М.: Буки Веди, 2021. - 388 с.
- [9] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. - 2-е изд. - М.: Наука, 1992. - 536 с.

3 Исследование динамики популяции быстрых ионов в плазме на установке ГОЛ-NB

^{1,2}Гороховский Ринат Геннадьевич, ¹Баткин В. И., ¹Куклин К. Н., ^{1,2,3}Полосаткин С. В.,
^{1,3}Поступаев В. В., ¹Ровенских А. Ф., ^{1,3}Сковородин Д. И.

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, Россия*

³ *Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия*

gorohovskiy.r@mail.ru

Научный руководитель: к. ф.-м. н., с. н. с. Полосаткин Сергей Викторович

Подразделение: Лаборатория 10

Статус: 2-й курс магистратуры

Текущее образовательное учреждение: НГТУ

Установка ГОЛ-NB [1] представляет собой линейную осесимметричную открытую ловушку с многопробочными секциями для удержания плазмы. Основной целью экспериментов, проводимых на этой установке, является исследование удержания плазмы в многопробочном (периодически модулированным вдоль оси) магнитном поле. Установка ГОЛ-NB состоит из центральной ловушки (пробкотрона) длиной 2.5 м с полем в центре $B = 0.3$ Тл и состыкованных к ней секций сильного поля длиной около 3 м каждая с $B = 4.5$ Тл. Плазма в установке создается плазменной пушкой, расположенной в расширителе на одном из торцов установки, и нагревается с помощью инъекции пучков быстрых атомов водорода. Два инжектора [2] с суммарной мощностью 1,1 МВт инжектируют в плазму пучки быстрых атомов с энергией 25 кэВ, формируя в центральной секции популяцию быстрых ионов.

Проходя через плазму, пучки быстрых атомов вследствие столкновений с электронами и ионами плазмы частично ионизируются, и возникающие быстрые ионы захватываются магнитным полем установки. Захваченные ионы осциллируют вдоль оси установки между точками останова (совпадающими с точками инъекции) и постепенно передают свою энергию электронам плазмы за счет упругих столкновений. Еще одним важным эффектом, приводящим к потере быстрых ионов, является перезарядка на нейтральном газе. Присутствие нейтрального газа в вакуумной камере и его проникновение в плазму приводят к потерям быстрых ионов вследствие резонансной перезарядки, снижающим эффективность нагрева плазмы.

Основным средством диагностики быстрых ионов на установке является анализатор нейтралов перезарядки [3], расположенный в одной из точек инъекции. Анализатор имеет 11 энергетических каналов, регистрирующих нейтралы в диапазоне от 5 до 25 кэВ. Интерпретация сигналов анализатора проводится путем сравнения измеряемых сигналов с ожидаемыми при заданной модельной функции распределения быстрых ионов и определения параметров этой функции распределения. Кроме того, анализатор позволяет прямо измерять время жизни ионов в плазме по спаду потока нейтралов после выключения инъекции.

В работе предложена модельная функция распределения быстрых ионов, описываемая одним параметром – соотношением мощности, передаваемой от ионов электронам плазмы, и мощности перезарядных потерь. Полученная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными и

позволяет изучать динамику эффективной мощности нагрева плазмы нейтральными пучками в процессе инжекции, а также рассмотреть влияние накопления нейтрального газа в системе на время жизни быстрых ионов.

- [1] V. Postupaev et al, Start of experiments in the design configuration of the GOL-NB multiple-mirror trap // Nuclear Fusion 62(8),086003 (2022)
- [2] V. Batkin et al., Neutral beam injectors for the GOL-NB facility // AIP Conference Proceedings 1771,030004 (2016)
- [3] S.Polosatkin et al., Neutral particle analyzer for studies of fast ion population in plasma // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 720, с. 42-44 (2013)

4 Модернизация ИОС источника отрицательных ионов водорода для прототипа инжектора высокоэнергетичных нейтралов

^{1,2}Ильенко Никита Сергеевич

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, Россия*

ilenko.nikita2015@gmail.com

Научный руководитель: к. ф.-м. н., н. с. Сотников Олег Захарович

Подразделение: Лаборатория 9-0

Статус: 1-й курс магистратуры

Текущее образовательное учреждение: НГТУ

Инжекторы высокоэнергетичных нейтралов являются одним из основных методов нагрева термоядерной плазмы. В ИЯФ СО РАН разработан и исследуется прототип инжектора нейтралов, в котором зона получения пучка отрицательных ионов с энергией пучка до 120 кэВ отделена от области ускорения пучка в одноапертурном ускорителе до энергии ~ 500 кэВ промежуточной секцией LEVT [1].

Источник использует классическую схему поверхностно-плазменных источников ОИ с высокочастотным генератором плазмы. Формирование пучка отрицательных ионов проходит в 4-х электродной ионно-оптической системе источника, состоящей из: плазменного электрода, ограничивающего плазму и являющегося эмиттером большой площади; вытягивающего электрода — системы из двух электродов, на которые подано вытягивающее напряжение, служащее для вытягивания ионов из плазмы при оптимальном положении плазменной границы и для перехвата сопутствующих электронов; ускоряющего электрода, используемого для ускорения пучка до полной энергии.

Целью проведенной работы было численное исследование формирования пучка в ИОС источника и модернизация конструкции его электродов для улучшения транспортировки пучка от источника на вход одноапертурного ускорителя на расстояние 5 м. Для расчета характеристик пучка использовался код IBSIMU [2]. Геометрия электродов и их положение в пространстве были созданы в программе параметрического трёхмерного моделирования FreeCad.

В результате моделирования была предложена новая геометрия сферического вытягивающего электрода с минимальной толщиной 6 мм, которая улучшает прохождение пучка через ИОС в ускорительную трубку источника и позволяет осуществлять эффективный сбор сопутствующих электронов при увеличенном эмиссионном токе пучка.

[1] Ivanov A., Belchenko Yu., Deichuli P., et al. Negative ion based neutral injector: Beam formation and transport // AIP Conf. Proc. V. 1771, P. 030012, (2016).

[2] T. Kalvas, et. al., "IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics Rev. Sci. Instrum. 81, 02B703, (2010).

5 Продольные и азимутальные скорости плазмы в винтовой ловушке СМОЛА

¹Инжеваткина Анна Александровна

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

a.a.inzhevatkina@inp.nsk.su

Научный руководитель: к. ф.-м. н. Судников Антон Вячеславович

Подразделение: Лаборатория 10

Статус: 4-й курс аспирантуры

Текущее образовательное учреждение: ИЯФ СО РАН

В ИЯФ СО РАН проводится экспериментальное исследование физики удержания и ускорения плазменного потока в открытой винтовой ловушке СМОЛА [1]. Плазма вращается в скрещенных $E \times B$ полях, и во вращающейся системе отсчета плазмы продольная скорость магнитных пробок сопоставима с продольной скоростью течения плазмы. Режим удержания и ускорения плазменного потока регулируется направлением магнитного поля.

Продольная скорость движения плазмы в винтовой секции определяется с помощью диагностики на основе зонда Маха, представляющего собой два ассиметричных двойных зонда, отделенных друг от друга керамической перегородкой. Такая конструкция позволяет регистрировать токи насыщения ионов, летящих строго по направлению плазменного потока и против него. Получены радиальные зависимости продольной скорости движения плазмы в транспортной секции от ее основных параметров.

В режиме удержания плазменного потока продольная скорость движения падает при увеличении среднего по сечению пробочного отношения. В режиме ускорения максимальное значение продольной скорости движения достигнуто в условиях, обеспечивающих максимальный интегральный по сечению поток, посчитанный по измерениям зондов, установленных на выходе из транспортной секции и в выходном расширителе установки.

Зонд Маха, установленный на вращающейся подвижке, позволяет измерять не только модуль скорости плазмы, но и ее направление относительно ведущего магнитного поля. Были проведено сравнение с результатами, полученными маховским зондом, движущимся только по радиусу плазмы и эмиссионными зондами.

В выходном расширителе скорость определяется с помощью спектрометра с высоким пространственным разрешением на основе МДР-23 [2], установленного под углом 30° к оси установки, по доплеровскому смещению спектральной линии излучения H_α . Максимальная продольная скорость в центре плазменного шнура составляет $V_z \sim 3 \cdot 10^6$ см/с. Продольные скорости движения, полученные благодаря оптической и зондовой диагностикам, согласуются друг с другом и лежат в одном диапазоне.

В докладе будут представлены основные зависимости продольной скорости движения от параметров плазмы и конфигурации магнитного поля: прямое поле, винтовое поле, комбинированное.

[1] A. V. Sudnikov et al. // Plasma flow suppression by the linear helical mirror system // Journal of Plasma Physics, 88(1), 905880102 (2022)

- [2] А.А. Инжеваткина и др. Исследование вращения плазмы в открытой винтовой ловушке СМОЛА // Физика плазмы, Т. 47. № 8. С. 706-715 (2021). DOI:10.31857/S0367292121080059

6 Устойчивость поверхностных дрейфовых волн в диамагнитной ловушке

^{1,2}Кардаш Данил Юрьевич

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия*

d.kardash@g.nsu.ru

Научный руководитель: к. ф.-м. н. Черноштанов Иван Сергеевич

Подразделение: Лаборатория 9-0

Статус: 2-й курс магистратуры

Текущее образовательное учреждение: НГУ

В данной работе исследуются условия возбуждения поверхностных волн и дисперсионное соотношение для волн переходной области в двух приближениях для диамагнитной ловушки [1]. Одна из моделей — это модель с жестким гофрированным цилиндром $r = r_0 + b \sin(m\varphi + kz)$ (где $r_0 \gg b$), в которой не учитываются взаимодействия частиц друг с другом, рассматривается условие возбуждения поверхностных волн по механизму Ландау. Из-за протекающего в переходной области диамагнитного тока магнитное поле практически полностью вытеснено плазмой из внутренней области, поэтому движение во внутренней области цилиндра можно рассматривать как прямолинейное. При внеосевой атомарной инжекции невозмущенные траектории быстрых ионов в переходном слое выглядят приблизительно как окружности с малым возмущением по радиусу, что значительно упрощает интегрирование уравнения. Это позволяет перейти к более точной модели с тонким слоем ионов. Во второй модели с тонким кольцом ионов определяется структура переходной области и дисперсионное соотношение путем решения возмущенного уравнения Власова методом интегрирования по невозмущенным траекториям [2].

Произведена оценка для условия резонансного взаимодействия горячих ионов внутренней области и поверхностных волн. Получено дисперсионное соотношение в пределе тонкого слоя быстрых ионов. Определенно условие резонансного взаимодействия быстрых ионов с поверхностными волнами и доля энергии, передаваемая по механизмы резонансного взаимодействия Ландау.

- [1] Beklemishev Alexei D. Improved plasma confinement at high beta AIP Conference Proceedings. — 2016. — Vol. 1771, no. 1. — P. 030001.
- [2] H. Vernon Wong, H. L. Berk, R. V. Lovelace, and N. Rostoker, "Stability of annular equilibrium of energetic large orbit ion beam Physics of Fluids B: Plasma Physics 3, 2973-2986 (1991) <https://doi.org/10.1063/1.859931>

7 Измерение радиального распределения плотности и электронной температуры мишенной плазмы на установке КОТ

^{1,2}Колесниченко Константин Сергеевич, ^{1,2}Мурахтин С. В., ^{1,2}Иванов Р. С.

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Буджера, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия*

k.kolesnichenko@g.nsu.ru

Научный руководитель: д. ф.-м. н. Багрянский Петр Андреевич

Подразделение: Лаборатория 9-1

Статус: 1-й курс магистратуры

Текущее образовательное учреждение: НГУ

Концепция диамагнитного удержания [1] позволяет увеличить энергетическое время жизни плазмы в сравнении с классическим пробкотроном. Возможность создания данной конфигурации, а также методы стабилизации, полученной плазмы, будут изучаться на установке КОТ. Создание высокоэнергетичной компоненты плазмы планируется при помощи двух атомарных инжекторов с суммарной мощностью более 2 МВт и средней энергией частиц 15 кэВ. Проведенные ранее расчеты [2] показали, что для эффективного накопления горячих ионов необходимо создание мишенной плазмы с достаточно высокой электронной температурой ($T_e \gtrsim 30 - 50$ эВ) и плотностью ($n \gtrsim 10^{13}$ см⁻³). В связи этим был выбран метод создания мишенной плазмы при помощи газоразрядного источника с кольцевой конфигурацией разрядного канала, исследованный на установке АМБАЛ-М [3]. В такой конфигурации создается радиальное электрическое поле, вызывающее развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, что приводит к нагреву ионов в стохастическом электрическом поле. В свою очередь ионы, обладающие высокой энергией ($E_i \sim 250$ эВ), при помощи кулоновских столкновений передают энергию электронам, повышая их температуру ($T_e \sim 50$ эВ). Подавление электронной теплопроводности между пробкотроном и источником плазмы осуществляется при помощи области сильного магнитного поля, формирующего термобарьер.

Для измерения параметров плазмы использовались три тройных ленгмюровских зонда, находящихся на разных продольных координатах и имеющие возможность изменения радиальной координаты. Полученные таким образом радиальные профили электронной температуры и плотности плазмы, которые будут представлены в докладе, позволят оценить эффективность захвата атомарных пучков и их дальнейшего удержания. В докладе также будут описаны результаты поиска оптимальных параметров мишенной плазмы в зависимости от параметров газоразрядного источника и конфигурации магнитного поля.

- [1] Beklemishev A. D. Diamagnetic “bubble” equilibria in linear traps //Physics of Plasmas. – 2016. – Т. 23. – №. 8. – С. 082506.
- [2] Yu.A. Tsidulko, I.S. Chernoshtanov, AIP Conference Proceedings, 1771, 040005, (2016), 10.1063/1.4964190/
- [3] Akhmetov T. D. et al. Experiments with dense plasma in the central solenoid of AMBAL-M //Fusion science and technology. – 2003. – Т. 43. – №. 1Т. – С. 58-62.

8 Моделирование баллонной моды в линейной системе с проводящими торцами

^{1,2}Константинов Сергей Евгеньевич, ^{1,2}Беклемишев А. Д.

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия*

s.konstantinov@g.nsu.ru

Научный руководитель: к. ф.-м. н. Беклемишев Алексей Дмитриевич

Подразделение: Лаборатория 9-0

Статус: 4-й курс аспирантуры

Текущее образовательное учреждение: НГУ

Линейные осесимметричные ловушки являются наиболее простым способом для магнитного удержания плазмы. Удержание в таких системах ограничено наличием магнитной ямы, из-за которой возникает диамагнитная неустойчивость. Одним из способов подавить поперечный перенос вследствие этой неустойчивости является режим вихревого удержания [2], в котором при помощи стеночных потенциалов удается создать в области удержания зону вихревого течения, в которой происходит нелинейное насыщение желобковых мод. В работах [1-2] описано влияние проводящих торцов на удержание в магнитных системах с низким давлением в электростатическом приближении. В данной работе производится обобщение, позволяющее учесть влияние проводящих торцов на систему с продольным током, возмущающим магнитное поле.

В работе получена система уравнений, обобщающая уравнения [1] на трехмерный случай, так что диамагнитная неустойчивость образуется преимущественно продольным током, а давление плазмы остается несущественным. Модель построена на сокращенной МГД [3] и использует параксиальное равновесие, что позволяет рассматривать различные магнитные конфигурации. Процедура усреднения вдоль силовой линии введена не по всей плазме, а по нескольким продольным составляющим. Это дает возможность исследовать не только электростатические (желобковые) возмущения, но и баллонные, рассмотреть влияние режимов со свободной и проводящей границей на удержание, а также получить критерий устойчивости.

- [1] Alexei D. Beklemishev, Peter A. Bagryansky, Maxim S. Chaschin & Elena I. Soldatkina (2010) Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps, *Fusion Science and Technology*, 57:4, 351-360
- [2] Beklemishev, A. D.; Bagryansky, P. A.; Chaschin, M. S., Soldatkina, E. I. Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps. *Fusion Science and Technology*, 2010, 57, 351-360
- [3] Нелинейные МГД-уравнения и диссипативные баллонные моды / Б. Б. Кадомцев, О. П. Погуце, Э. И. Юрченко. — М. : ИАЭ, 1983. — 20 с. : граф.; 21 см.

9 Подготовка к исследованию возможностей применения высокотемпературных керамических материалов для покрытия первой стенки термоядерных реакторов

¹Рыжков Георгий Андреевич

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Буджера, Новосибирск, Россия*

ryzhkov.george98@gmail.com

Научный руководитель: д. ф.-м. н. Вячеславов Леонид Николаевич

Подразделение: Лаборатория 10

Статус: 1-й курс аспирантуры

Текущее образовательное учреждение: ИЯФ СО РАН

Одной из ключевых проблем создания термоядерного реактора является проблема обращённой к плазме стенки. Как известно, в реакторе с магнитным удержанием первая стенка рабочей камеры и плазмоприёмники в диверторе будут подвергаться различными видами воздействия из-за интенсивных потоков нейтронов и энергичных заряженных и нейтральных частиц. Энергичные частицы, поглощаясь в тонком слое материала стенки, вызывают его сильный нагрев и его интенсивную эрозию. Наиболее сильное воздействие оказывают импульсные потоки частиц на стенку, образующиеся вследствие переходных процессов в плазме реактора. Термические удары, возникающие в результате этих процессов, являются наиболее разрушительными для первой стенки.

Существуют различные подходы к выбору материала первой стенки. Это металлы с высокой температурой плавления, такие как вольфрам и его сплавы, или наоборот, металлы с очень низкой температурой плавления, но малым Z , такие как литий или бериллий. Давно привлекают внимание в качестве материала первой стенки и высокотемпературные керамические композиты, имеющие относительно невысокий средний Z . Материалы с малым Z имеют преимущества в том, что в случае попадания их в виде примесей в плазму не должно происходить значительного роста потерь плазмы на излучение. Поэтому исследование таких материалов с малым Z является актуальным.

В ИЯФ СО РАН проводятся эксперименты по моделированию влияния термоударов на материалы на специальном стенде с лазерным импульсом субмиллисекундной длительности. Для отработки режимов лазера, а также систем диагностики на стенде использовался керамический образец из B_4C . Сами диагностики определяют динамики температуры и изменения рассеяния света от поверхности образца *in situ* непосредственно во время процесса нагрева и таким образом дают возможность подробно описать изменение состояния поверхности. Однако существует вопрос точности определения температуры методом пирометрии, так как доступно малое количество экспериментальных литературных данных по излучательной способности материала. Поэтому было предложено сравнить экспериментальную динамику температуры с теоретическим моделированием. Моделирование производилось на основе термодинамических параметров B_4C , взятых из литературы, и поглощенной образцом плотности мощности лазерного излучения.

В экспериментах для определения температуры использовались InGaAs камера и InGaAs фотодиод. Полученные результаты сравниваются с теоретическим моделированием и затем была оценена точность пирометрии. Также было найдено, что при высоких температурах, порядка 2000 К, теоретическое моделирование даёт завышенные результаты, что может быть связано с распылением материала, которое было обнаружено по снимкам с камеры.

10 Равновесие плазмы в режиме диамагнитного удержания в открытой ловушке с инъекцией высокоэнергичных атомов

^{1,2}Христо Михаил Сергеевич

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия*

khristo.mikhail@gmail.com

Научный руководитель: к. ф.-м. н. Беклемишев Алексей Дмитриевич

Подразделение: Лаборатория 9-0

Статус: 4-й курс аспирантуры

Текущее образовательное учреждение: ИЯФ СО РАН

Диамагнитное удержание или диамагнитный пузырь [1–7] – новый режим, нацеленный на улучшение удержания плазмы в линейных системах. Основная идея этого режима заключается в создании плазменного «пузыря» высокого давления в центральной части открытой ловушки. Внутри такого пузыря давление плазмы достигает предела по равновесию, соответствующего $\beta \rightarrow 1$, а магнитное поле стремится к нулю из-за диамагнетизма плазмы. Время жизни частиц в режиме диамагнитного удержания оценивается в [1, 2, 7] в рамках магнитной гидродинамики следующим образом:

$$\tau_{DC} \sim \sqrt{\tau_{GD}\tau_{\perp}},$$

где τ_{GD} – время жизни в газодинамической ловушке [8], а τ_{\perp} – характерное время поперечного переноса. Поскольку перенос плазмы поперек магнитного поля обычно сильно подавлен: $\tau_{\perp} \gg \tau_{GD}$, ожидается, что удержание плазмы в диамагнитном пузыре значительно улучшится по сравнению с «классической» газодинамической ловушкой: $\tau_{DC} \sim \tau_{GD}\sqrt{\tau_{\perp}/\tau_{GD}} \gg \tau_{GD}$.

Магнитное поле внутри диамагнитного пузыря близко к нулю. При этом ларморовский радиус и дли- на свободного пробега достаточно высокоэнергичных частиц могут быть сравнимы или даже превышать характерный масштаб неоднородности магнитного поля. Особенно это характерно для ГДМЛ [9, 10], где для нагрева плазмы планируется использовать инъекцию нейтральных пучков высокой энергии. Для описания равновесия в такой системе мы предполагаем, что плазма состоит из двух фракций: фоновой теплой плазмы и горячих ионов, образующихся в результате нейтральной инъекции. Теплую плазму считаем находящейся в локальном термодинамическом равновесии и описываем в рамках МГД. В частности за основу была взята гидродинамическая модель, построенная в более ранних работах [1, 2, 7]. Горячие ионы, напротив, имеют неравновесную функцию распределения и описываются в рамках кинетической теории. Также мы предполагаем, что атомы инжектируются в область фазового пространства, где, во-первых, выполняется критерий абсолютного удержания [11–14], а во-вторых, нарушается условие адиабатичности [3, 6]. Первое позволяет не учитывать продольные потери горячих ионов через пробки, что значительно упрощает задачу. Второе позволяет считать, что функция распределения горячих ионов равномерно «размазана» по гиперповерхности постоянного азимутального момента импульса и полной энергии и тем самым не зависит от адиабатического инварианта. Также мы предполагаем, что энергия горячих ионов значительно превышает температуру теплой плазмы. В этом приближении горячие ионы в основном

тормозятся на электронах теплой плазмы, а столкновения с другими ионами слабо влияют на их движение. На основании этого мы полностью пренебрегаем угловым рассеянием при расчете функции распределения горячих ионов и учитываем только слабую силу трения со стороны теплых электронов.

- [1] A D Beklemishev. Diamagnetic “bubble” equilibria in linear traps. *Physics of Plasmas*, 23(8):082506, 2016.
- [2] Mikhail S Khristo and Alexey D Beklemishev. High-Pressure Limit of Equilibrium in Axisymmetric Open Traps. *Plasma and Fusion Research*, 14:2403007–2403007, 2019.
- [3] Igor Kotelnikov. On the structure of the boundary layer in a Beklemishev diamagnetic bubble. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 62(7):075002, 2020.
- [4] Ivan Chernoshtanov. Collisionless particle dynamic in an axi-symmetric diamagnetic trap. 2020.
- [5] I S Chernoshtanov. Collisionless dynamics of particles in diamagnetic trap. *Plasma physics*, 48(2):99–110, 2022.
- [6] I S Chernoshtanov. Collisionless Particle Dynamics in Diamagnetic Trap. *Plasma Physics Reports*, 48(2):79– 90, 2022.
- [7] M S Khristo and A D Beklemishev. Two-dimensional MHD equilibria of diamagnetic bubble in gas-dynamic trap. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 64(9):095019, 2022.
- [8] A A Ivanov and V V Prikhodko. Gas dynamic trap: experimental results and future prospects. *Physics-Uspexhi*, 60(5):509–533, 2017.
- [9] A Beklemishev, A Anikeev, V Astrelin, P Bagryansky, A Burdakov, V Davydenko, D Gavrilenko, A Ivanov, I Ivanov, M Ivantsivsky, I Kandaurov, S Polosatkin, V Postupaev, S Sinitsky, A Shoshin, I Timofeev, and Yu Tsidulko. Novosibirsk Project of Gas-Dynamic Multiple-Mirror Trap. *Fusion Science and Technology*, 63(1T):46–51, 2013.
- [10] P A Bagryansky, A D Beklemishev, and V V Postupaev. Encouraging Results and New Ideas for Fusion in Linear Traps. *Journal of Fusion Energy*, 38(1):162–181, 2019.
- [11] A I Morozov and L S Solov’ev. Motion of Charged Particles in Electromagnetic Fields. In M A Leontovich, editor, *Reviews of Plasma Physics*, volume 2, pages 201–297. Consultants Bureau, New York, 1966.
- [12] R V Lovelace, D A Larrabee, and H H Fleischmann. A re-analysis of exponential rigid-rotor astron equilibria. *Physics of Fluids*, 21(5):863, 1978.
- [13] D A Larrabee, R V Lovelace, and H H Fleischmann. Truncated exponential-rigid-rotor model for strong electron and ion rings. *Nuclear Fusion*, 19(4):499–503, apr 1979.
- [14] Ming-Yuan Hsiao and George H Miley. Velocity-space particle loss in field-reversed configurations. *Physics of Fluids*, 28(5):1440, 1985.

11 Динамика ионов в сильно-нелинейной кильватерной волне

^{1,2}Худяков Вадим Константинович

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия*

vhudyakov12@gmail.com

Научный руководитель: д. ф.-м. н., проф. Лотов Константин Владимирович

Подразделение: Сектор 5-12

Статус: 3-й курс аспирантуры

Текущее образовательное учреждение: НГУ

В современных экспериментах по кильватерному ускорению релятивистские электронные пучки (или лазерные импульсы) возбуждают кильватерные волны с плотностью энергии порядка плотности энергии покоя электронов. После разрушения подобной нелинейной волны, в плазме остаются медленно изменяющиеся поля и токи, которые возмущают ионную плотность на временных масштабах много больше плазменного периода. В данной работе изучается долговременная динамика ионов при помощи численного моделирования кодом LCODE на примере эксперимента лаборатории FACET (SLAC), в котором волна возбуждается электронным пучком в blowout-режиме в радиально ограниченной плазме.

В динамике ионов выделяются четыре основных физических эффекта. (1) Притяжение ионов к оси полями драйвера и волны, приводящее к образованию пика плотности, что является типичным явлением, наблюдаемым во многих режимах возбуждения кильватерной волны, однако, имеющим различные механизмы формирования. (2) Генерация ионно-звуковых солитонов после распада осевого пика. (3) Появление нескомпенсированного положительного заряда плазмы в результате опрокидывания волны, который приводит к разлёту ионов в радиальном направлении с границы плазмы. (4) Пинч-эффект под действием тока, возникшего во время опрокидывания волны. Совместное проявление этих эффектов приводит к образованию различных профилей радиальной плотности, которые трудно получить каким-либо другим способом.

12 In situ исследование эрозии поверхности высокотемпературных керамик в результате импульсного нагрева, возможного в термоядерных установках при магнитном удержании плазмы

¹Черепанов Дмитрий Евгеньевич

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*

dcherepanov9884@gmail.com

Научный руководитель: д. ф.-м. н. Вячеславов Леонид Николаевич

Подразделение: Лаборатория 10

Статус: 3-й курс аспирантуры

Текущее образовательное учреждение: НГУ

Термоядерные установки нуждаются в исследовании новых материалов для изготовления обращенных к плазме компонентов (ОПК). Утвержденный сейчас материальный состав, например, токамака ИТЕР имеет ряд недостатков, среди которых высокое среднее зарядовое число, а также недостаточная устойчивость ОПК импульсному нагреву. Перспективной, но крайне плохо исследованной идеей является предложение применения высокотемпературных керамик для изготовления ОПК токамаков. Среди основных преимуществ высокотемпературных керамик можно отметить низкое среднее зарядовое число и достаточно высокую рабочую температуру. Главные недостатки – повышенная хрупкость и высокое удержание трития, особенно, в случае углеродсодержащих керамик.

При выборе материала необходимо понимать детали деструктивных процессов, происходящих с ним, в частности, во время термических ударов, которые могут возникать в случае срывов плазмы и появления ЭЛМ при удержании плазмы в режиме H-mode (ожидаемая поверхностная плотность мощности до 10 ГВт/м^2 , при длительности около 1 мс). Для изучения эрозии высокотемпературных керамик при импульсном нагреве на базе установки БЕТА [1] был создан стенд с in situ диагностическими системами. Термические удары моделировались с использованием импульсного лазера ГОС-1001, генерирующего излучение на длине волны 1.06 мкм с полной энергией за импульс до 200 Дж при длительности 0.5 – 0.8 мс. С использованием линз и рассеивателей излучения можно добиться плотности мощности на поверхности образца до 10 ГВт/м^2 , что позволяет моделировать импульсный нагрев, соответствующий нагреву, ожидаемому во время переходных процессов в ходе удержания плазмы. Стенд был снабжен диагностическими системами для отслеживания динамики эрозии облучаемой поверхности образцов, ее температуры, а также поглощенной плотности мощности.

В ходе экспериментальной работы было проведено испытание керамик, считающихся перспективными с целью применения в качестве материала для изготовления защиты ОПК токамаков: карбида бора и карбида кремния. Оба образца были изготовлены методом горячего прессования и обладают высокой устойчивостью как к механическому, так и тепловому воздействию. Экспериментальные результаты позволили охарактеризовать поведение керамик во время термических ударов, определить допустимые параметры нагрева, при которых не происходит эрозии поверхности, а также сделать выводы о перспективности их использования в термоядерных установках с точки зрения устойчивости в случае возникновения переходных процессов во время удержания плазмы.

[1] L.N. Vyacheslavov et al., Phys. Scripta 93 (2018) 035602

13 Эксперименты по удержанию плазмы на ГДЛ в магнитных конфигурациях со сближенными точками остановки

^{1,2}Шмигельский Евгений Анатольевич, ^{1,2}Лизунов А. А., ¹Мейстер А. К., ¹Пинженин Е. И.,
^{1,3}Соломахин А. Л., ¹Яковлев Д. В.

¹ *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия*
² *Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, Россия*
³ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*

e.shmigelskii@g.nsu.ru

Научный руководитель: к. ф.-м. н., с. н. с. Яковлев Дмитрий Вадимович

Подразделение: Лаборатория 9-1

Статус: 1-й курс аспирантуры

Текущее образовательное учреждение: НГУ

Представляющие интерес режимы удержания плазмы с увеличенным относительным давлением β в открытой магнитной ловушке ГДЛ (ИЯФ СО РАН) могут быть достигнуты за счет повышения плотности энергии быстрых анизотропных ионов, движущихся адиабатически между точками остановки. Модификации магнитной конфигурации ГДЛ позволили удерживать быстрые ионы в двух новых режимах, характеризующихся разной степенью сближения точек их остановки: в 1,5 и в 2 раза.

В рамках данной работы в конфигурации с сокращенной в 1,5 раза областью движения быстрых ионов была проведена серия экспериментов по оптимизации условий разряда для достижения режима удержания с максимальным значением вытесненного плазмой магнитного потока — диамагнетизма. В случае конфигурации со сближенными в 2 раза точками остановки быстрых ионов были подобраны условия для осуществления МГД-устойчивых разрядов и проведена их предварительная оптимизация. Кроме того, в режимах с наиболее высокими значениями диамагнетизма были проведены измерения радиальных профилей температуры и плотности электронов. Результаты обсуждаются в докладе в контексте их сравнения с аналогичными измерениями для стандартной магнитной конфигурации установки.

В конфигурациях с сокращенной областью движения быстрых ионов в исследуемой области параметров плазма подвержена развитию Альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости [1, 2], которая возбуждается на начальном этапе разряда и далее, нелинейно насыщаясь, существует почти непрерывно. Неустойчивость приводит к рассеянию быстрых ионов и ограничивает их рост их давления, главным образом, в точке остановки. В связи с этим, в докладе описано, как АИЦН проявляется и влияет на удержание быстрых ионов в условиях различных конфигураций и величин магнитного поля.

[1] Zaytsev K. V. et al. Phys. Scr. 161, 014004 (2014).

[2] Аникеев А. В. и др. Физика плазмы, 2015, Т. 41, № 10, с. 839-849.