

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук
Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики
Лаборатория Физики Высокотемпературной плазмы

Шулятьев Константин Дмитриевич
**Исследование поведения быстрых частиц на сферическом токамаке
Глобус-M2 в режиме с нейтральной инжекцией**

Специальность 1.3.9 – физика плазмы

Научный доклад

Санкт-Петербург

2024

Научный руководитель: В.Б. Минаев, ведущий научный сотрудник лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А. Ф. Иоффе, кандидат физико-математических наук

Рецензент: М.И. Миронов, старший научный сотрудник лаборатории процессов атомных столкновений ФТИ им. А. Ф. Иоффе, кандидат физико-математических наук

Рецензент: П.Р. Гончаров, Заведующий Научной лабораторией перспективных методов исследования плазмы сферических токамаков ФГАОУ ВО «СПбПУ, Ph.D.

Оглавление

Общая характеристика работы	4
Актуальность темы	4
Цель научного исследования	6
Задачи научного исследования.....	6
Научная новизна работы	7
Основные положения работы	7
Апробация работы	7
Содержание работы.....	8
Глава 1. Исследование ионного компонента на токамаках Глобус-М/М2	8
1.1 Сферические токамаки Глобус-М и Глобус-М2.....	8
1.2 Диагностики токамака Глобус-М2, используемые в работе	9
Глава 2. Анализатор CNPA-09 на токамаке Глобус-М2	12
2.1 Схема анализатора и принцип работы.....	12
2.2 Разработка программы управления и обработки результатов измерений	15
Глава 3. Экспериментальная апробация анализатора CNPA-09	19
3.1 Положение анализатора в диагностическом комплексе.....	19
3.2 Измерение спектров атомов перезарядки и ионной температуры плазмы	20
3.3 Новое положение анализатора	33
Заключение	35
Публикации основных результатов.....	36
Список литературы	37

Общая характеристика работы

Актуальность темы

На момент 2024 года население Земли превышает 8 миллиардов человек, а ежегодный прирост составляет порядка 100 миллионов человек [1]. Рост населения приводит к увеличению спроса на электроэнергию, который необходимо обеспечивать, занимаясь постройкой новых электростанций. Этим занимается энергетика – область хозяйства государства, которая включает в себя природные ресурсы, их добычу, переработку, использование для генерации энергии и системы, отвечающие за передачу этой энергии до конечного потребителя. Существует множество типов электростанций и выбор той или иной в основном определяется стоимостью постройки, возможными объемами генерируемой мощности и безопасностью обслуживания [2]. Электростанции используют для генерации энергии различные ресурсы, такие как ископаемое топливо (нефть, газ, уголь, уран), а также возобновляемые источники энергии (солнечная, геотермальная, гидро- и ветровая энергия, биотопливо). Электростанции, использующие невозобновляемые ресурсы ограничены запасами природных ресурсов, а использующие возобновляемые – либо не обеспечивают постоянный уровень генерации энергии (ветряные и солнечные), либо зависят от местоположения ресурса генерации и не подходят для постройки по всему миру (гидроэлектростанции и геотермальные электростанции).

Одним из вариантов решения описанной проблемы является термоядерная энергетика. Она основана на реакциях синтеза, в результате которых легкие ядра соединяются в более тяжелые и выделяется энергия в виде продуктов реакции, которую впоследствии можно будет преобразовать в энергию, доступную для потребления. Оптимальной с точки зрения стоимости и возможности реализации является реакция синтеза дейтерия и трития. Основным продуктом этой реакции является нейтрон с энергией 14.1 МэВ, а побочным – гелий-4 с энергией 3.5 МэВ. В качестве топлива выступают

изотопы водорода – дейтерий и тритий. Дейтерий в природе широко распространен, мировое производство дейтерия – десятки тысяч тонн в год. Тритий получают в ядерных реакторах путем облучения лития-6 нейтронами. Помимо этого, тритий можно будет нарабатывать аналогичным способом, используя нейтроны, образующиеся в реакции термоядерного синтеза. Кроме генерации энергии и наработки трития, высокоэнергичные нейтроны можно использовать для переработки отходов атомных электростанций и для производства новых видов ядерного топлива.

Управляемый термоядерный синтез изотопов водорода является перспективным направлением исследований, и наибольшие успехи в этой области достигли установки типа токамак, в которых реакции синтеза происходят в плазме, удерживаемой магнитным полем установки. На данный момент идет сооружение международного прототипа токамака-реактора ИТЭР во Франции, который должен будет продемонстрировать длительную самоподдерживающуюся реакцию термоядерного синтеза. Однако, для создания полноценных электростанций будет необходимо увеличить КПД и значительно уменьшить стоимость производства подобных установок, на что необходимо потратить несколько десятков лет.

Чтобы приблизить начало практического использования реакций ядерного синтеза, можно создавать гибридные реакторы синтеза-деления [3], в которых токамак будет работать в качестве термоядерного источника нейтронов и будет использован для управления подкритичной зоной ядерного реактора. В этом случае необходимость в самоподдерживающейся термоядерной реакции отпадает – достаточно использовать токамак в импульсном режиме, в котором реакция синтеза будет достигаться за счет взаимодействия пучка высокоэнергичных атомов с плазмой. Перспективным кандидатом для установок такого типа являются сферические токамаки, в силу своей компактности. Однако, существует ряд проблем, связанных с использованием таких установок в качестве термоядерного источника нейтронов. Например, удержание быстрых частиц, возникающих в плазме при

дополнительном нагреве высокоэнергичными пучками. Теряясь, частицы разрушают первую стенку токамака, а скорость реакции синтеза падает, что приводит к падению потоков нейтронов.

Токамак Глобус-М являлся сферическим токамаком с малыми размерами (большой и малый радиусы 0.36 м и 0.24 м соответственно), который был оснащен одним инжектором атомов высокой энергии, системами волнового нагрева плазмы и обширным диагностическим комплексом. Эти обстоятельства сделали Глобус-М идеальным кандидатом для изучения особенностей дополнительного нагрева в компактных установках, а также исследования удержания быстрых частиц [4].

В 2018 году был запущен сферический токамак Глобус-М2, который является идейным продолжением токамака Глобус-М с модифицированной электромагнитной системой, рассчитанной на более высокие параметры. Помимо этого, комплекс систем дополнительного нагрева был дополнен новым инжектором с более высокой энергией инжекции. Исследования на токамаке Глобус-М2 позволят расширить область знаний, связанную с поведением быстрых частиц в компактных установках.

Цель научного исследования

Исследовать поведение быстрых частиц в токамаке Глобус-М2 в условиях дополнительного нагрева методом нейтральной инжекции.

Задачи научного исследования

- Разработка программного обеспечения анализатора CNPA-09 для управления прибором в эксперименте и первичной обработки измерений.
- Внедрение анализатора в диагностический комплекс сферического токамака Глобус-М2. Экспериментальная апробация прибора.
- Исследование спектров атомов перезарядки в разрядах с нейтральной инжекцией в широком диапазоне плазменных

параметров. Сравнение результатов измерений с другими диагностиками.

Научная новизна работы

Впервые для Глобус-М2 был экспериментально измерен спектр атомов перезарядки в диапазоне энергий выше 30 кэВ. Исследовано поведение быстрых частиц с энергиями, превышающими энергию инжекции.

Основные положения работы

1. Разработано ПО для анализатора атомов перезарядки CNPA-09.
2. Прибор успешно внедрен в диагностический комплекс установки.
3. Прибор измеряет подробный спектр атомов перезарядки в диапазоне от тепловых до надинжекционных энергий, что позволяет получать информацию об ионной температуре плазмы и исследовать особенности торможения и удержания быстрых частиц.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на конференциях:

- I Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, Московская область, 20 – 24 марта 2023 г
- «Диагностика высокотемпературной плазмы». XX Всероссийская конференция, г. Сочи, 18 – 22 сентября 2023 г

Содержание работы

Глава 1. Исследование ионного компонента на токамаках Глобус-М/М2

1.1 Сферические токамаки Глобус-М и Глобус-М2

Сферический токамак Глобус-М [5] имел большой и малый радиус 0.36 м и 0.24 м соответственно, тороидальное магнитное поле $B_t < 0.5$ Тл, позволял получить разряд с током плазмы $I_p < 300$ кА и длительностью менее 130 мс. Нагрев плазмы осуществлялся омическим способом и с применением дополнительного нагрева волновыми методами (ион-циклотронный нагрев и ниже-гибридная генерация тока) и инжекцией высокоэнергичных атомарных пучков. Инжекция атомов водорода и дейтерия осуществлялась при энергии пучка 18–30 кэВ с мощностью 0.3–1.0 МВт. Длительность инжекции составляла ≤ 50 мс.

В 2018 году был осуществлен физический пуск токамака Глобус-М2 – модифицированной версии токамака Глобус-М с новой электромагнитной системой, рассчитанной на тороидальное магнитное поле $B_t = 1$ Тл, ток плазмы $I_p < 500$ кА, и длительность плазменного импульса до 250 мс [6, 7, 8]. Модернизация электромагнитной системы обеспечивает удержание быстрых частиц с энергиями до 100 кэВ. Система дополнительного нагрева токамака была дополнена вторым инжектором, рассчитанным на инжекцию атомарных пучков с энергией до 50 кэВ длительностью до 1 с.

Для расширения экспериментальных возможностей по исследованию поведения быстрых частиц в диагностический комплекс токамака Глобус-М2 был интегрирован новый анализатор CNPA-09. Помимо этого в работе были использованы действующие диагностики установки:

- 1) Анализаторы атомов перезарядки АКОРД-12 и АКОРД-24.
- 2) Диагностика активной спектроскопии перезарядки CXRS.
- 3) Диагностика томсоновского рассеяния.

1.2 Диагностики токамака Глобус-М2, используемые в работе

Комплекс корпускулярной диагностики до недавнего времени включал анализаторы атомов перезарядки типа АКОРД [9], которые являются ключевыми для исследования ионного компонента плазмы, поскольку производят измерения спектров атомов перезарядки, по которым можно определять температуру ионов, изучать особенности торможения быстрых частиц, возникающих при инжекции атомарных пучков высокой энергии, изучать влияние плазменных неустойчивостей на удержание этих частиц.

Принцип работы анализаторов заключается в следующем: поток атомов перезарядки выходит из плазмы и попадает в анализатор. Внутри анализатора находится газовая мишень, при столкновении с которой атомы перезарядки ионизируются. После этого происходит разделение по массам и энергиям в параллельных магнитном и электрическом полях. Вторичные ионы направляются на детекторные модули и регистрируются. В случае анализаторов АКОРД токамака Глобус-М перезарядочная мишень – газовая, а детекторный модуль состоит из двух линеек, что позволяет исследовать потоки водорода и дейтерия одновременно.

Оба анализатора оснащены системами пространственного сканирования, которая обеспечивает угловое перемещение приборов в вертикальной плоскости в диапазоне $\pm 10^\circ$. Кроме того, для анализатора АКОРД-12 реализовано сканирование по горизонтали на $\pm 10^\circ$. Эти анализаторы были использованы в работах по измерению ионной температуры [10], определению изотопного состава плазмы [11], исследованию спектров атомов высокой энергии, возникающих в плазме при дополнительном нагреве [12], исследованию удержания быстрых частиц при возникновении различных плазменных неустойчивостей [13]. Также при использовании системы пространственного сканирования возможно восстановление профиля ионной температуры при условии измерений в серии одинаковых импульсов токамака. Энергетический диапазон анализаторов АКОРД токамака Глобус-М2

ограничен энергией 30 кэВ, поэтому возникла необходимость в новом приборе – анализаторе CNPA-09 – энергетический диапазон которого позволит исследовать спектры атомов перезарядки в области энергий выше инжекционной (50 кэВ).

Диагностика CXRS токамаков Глобус-М/М2 [14, 15] основана на анализе излучения, возникающего в плазме токамака в результате инжекции высокоэнергичных атомарных пучков. В области прохождения пучка протекает реакция перезарядки примесных ионов на атомах пучка. Диагностика использует для анализа линии свечения водородоподобного атома углерода $C^{VI}(5290.5 \text{ \AA})$. Из характеристик спектра зарегистрированного излучения возможно извлечь информацию о локальной температуре ионов примеси (по доплеровскому уширению линий) и скорости их движения (по доплеровскому смещению линии). Поскольку в плазме токамака время переноса энергии от ионов примеси к ионам основной плазмы намного меньше времени удержания энергии, можно полагать, что температура ионов примеси равна температуре ионов основной плазмы. В настоящее время диагностика CXRS имеет 7 пространственных точек и позволяет измерять профили ионной температуры и скорости тороидального вращения плазмы с временным разрешением 5 мс.

Диагностика томсоновского рассеяния токамаков Глобус-М/М2 [16, 17] позволяет получить информацию о пространственном распределении плотности и температуры электронов. Принцип работы основан на измерении интенсивности и спектре зондирующего излучения, рассеянного на электронах плазмы. В качестве источника используется лазер с длиной волны 1064 нм и импульсом менее 12 нс. Для измерения спектра рассеянного излучения происходит при помощи фильтровых полихроматоров. По спектрам определяются температура и концентрация электронов. Сбор рассеянного излучения из области пересечения хорды наблюдения и хорды зондирования лазера позволяет получить локальные значения параметров плазмы, а использование нескольких полихроматоров с различными хордами

наблюдения позволяет получить информацию о пространственном распределении плотности и температуры электронов плазмы.

Данные диагностики активной спектроскопии перезарядки CXRS и диагностики томсоновского рассеяния используются в моделировании потоков атомов, испускаемых плазмой, при помощи кода DOUBLE MC [18].

Помимо вышеперечисленных систем были использованы другие диагностики, позволяющие отслеживать равновесие плазменного шнура [19, 20], а также диагностики, регистрирующие события, связанные с различными плазменными неустойчивостями, которые влияют на удержание быстрых частиц [21, 22].

2.1 Схема анализатора и принцип работы

Для обеспечения измерений в диапазоне от тепловых энергий до энергий выше максимальной энергии инжекции (50 кэВ) в лаборатории процессов атомных столкновений был разработан анализатор CNPA-09 [23]. Схема прибора представлена на рис. 2.1.1:

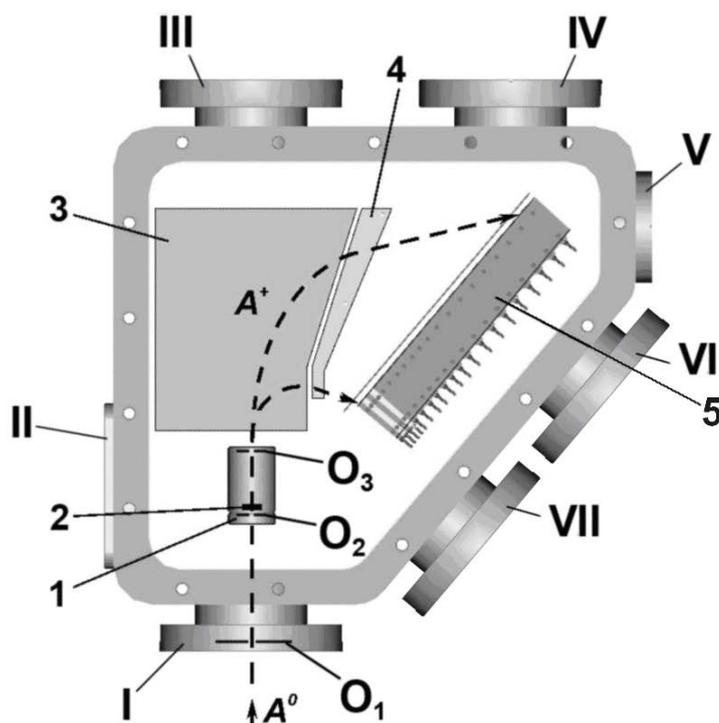


Рис. 2.1.1. Схема анализатора CNPA-09.

Корпус анализатора состоит из единой камеры и двух крышек (верхней и нижней). Размеры камеры 302x326x169 мм. Камера и обе крышки изготовлены из нержавеющей стали. На боковой стенке размещены семь фланцев: **I** – входной фланец, **II** – фланец ускорительного модуля, **III** – фланец прямого канала, **IV** – фланец дополнительной откачки, **V** – фланец высоковольтных вводов, **VI**, **VII** – фланцы сигнальных разъемов.

Анализатор работает следующим образом: поток атомов перезарядки A^0 проходит через диафрагму O_1 (диаметр 3.7 мм) фланца **I**. Внутри камеры после входного фланца расположен ускорительно-обдирочный модуль **1**. Ионизация

атомов перезарядки A^0 происходит на углеродной пленке **2**, толщина которой составляет ~ 50 ангстрем. К пленке может быть приложено ускоряющее напряжение, что позволяет улучшить сбор и повысить фокусировку вторичных ионов A^+ после их рассеяния в пленке. Для снижения влияния внешних магнитных полей на траектории ионов ускорительный модуль окружен цилиндрическим магнитным экраном толщиной 2.5 мм. На входе и выходе ускорительного модуля расположены диафрагмы O_2 и O_3 (диаметр 5 мм).

После ускорительного модуля поток вторичных ионов A^+ пролетает через систему анализирующего магнита – **3**, в котором для создания поля используются два постоянных редкоземельных магнита. Магнитный зазор системы имеет сложную двумерную форму, которая обеспечивает фокусировку ионов на детекторной плоскости.

После магнитной системы **3** установлен электростатический дефлектор **4**, который, в зависимости от поданного напряжения, направляет потоки вторичных ионов водорода или дейтерия на детекторный модуль **5**. Детекторный модуль содержит 44 детектора, расположенных в один ряд и позволяет одновременно регистрировать один тип изотопа водорода. Тип детекторов – каналные электронные умножители с максимальной скоростью счета 1 МГц.

Для контроля потока атомов, поступающих в анализатор прибор оснащен узлом подвижной диафрагмы. Диафрагма располагается на пути потока атомов и имеет форму трапеции (ближе к крайним положениям – треугольник). Диафрагма образуется за счет 2 параллельных неподвижных пластин, фиксированных на расстоянии 2 мм, и подвижной треугольной шторки с углом раствора $\approx 9^\circ$, которая перемещается перпендикулярно щели при помощи манипулятора.

На рисунке 2.1.2 изображен анализатор в сборе с узлом подвижной диафрагмы и аппаратура для управления, питания и измерения – 4 счетных модуля – по одному модулю на 11 энергетических каналов анализатора – и

высоковольтный модуль. Управление счетными модулями и сбор данных осуществляются по UDP протоколу через Ethernet. Счетные модули работают одновременно и имеют порты для подключения сигнала синхроимпульса. Высоковольтный модуль подключается по Ethernet через виртуальный COM-порт, связь осуществляется по протоколу RS485.



Рис. 2.1.2. Анализатор CNPA-09 и аппаратура для измерения и управления. Слева – общий вид анализатора с узлом подвижной диафрагмы, справа – высоковольтный и счетные модули

Поток атомов перезарядки, регистрируемый энергетическим каналом, рассчитывается по формуле:

$$F_{ch}(E) = \frac{N_{ch}(E)}{\Omega S \times \Delta E_{ch} \times \varepsilon_{ch}} ,$$

где $N_{ch}(E)$ – скорость счета детектора, ΩS – произведение телесного угла, в пределах которого атомы перезарядки попадают в анализатор, на площадь поверхности области плазмы, которая находится на линии наблюдения анализатора, ΔE_{ch} – энергетическое разрешение канала анализатора, ε_{ch} – эффективность регистрации.

ΩS рассчитывается в предположении, что видимая область вдоль линии наблюдения анализатора ограничена только размерами подвижной диафрагмы и диафрагмы O_1 на входном фланце анализатора и равна $\Omega S = S_{dia} S_{O_1} / L^2$, где

S_{dia} и S_{O_1} – площади диафрагм, L – расстояние между ними. ΔE_{ch} и ε_{ch} зависят от коэффициентов, полученных при калибровке в работе [24] и напряжения на ускорительном модуле.

2.2 Разработка программы управления и обработки результатов измерений

Для работы в эксперименте было необходимо разработать программу, обеспечивающую управление 4 счетными модулями, высоковольтным модулем, который обеспечивает питание ускорительного модуля, анализирующего электростатического дефлектора и детекторной линейки. Помимо этого, программа должна была обеспечить первичную обработку экспериментальных данных (вычисление потоков атомов перезарядки и определение температуры ионов по тепловой части спектра) и их визуализацию.

Для решения этой задачи была выбрана среда разработки для графического программирования LabVIEW. Такой выбор обусловлен широким набором встроенных инструментов для создания пользовательского интерфейса. Это позволило достаточно быстро создать внешнюю оболочку программы со всей необходимой визуализацией и сконцентрироваться на внутренней работе кода. На рисунке 2.2.1 изображена машина состояний программы анализатора CNPA-09, описывающая логику работы кода.

В начале работы происходит этап инициализации со считыванием всех калибровочных таблиц, и первичной настройкой отображения окна программы. После этого программа находится в цикле ожидания команды пользователя. Параллельно работают циклы для взаимодействия с высоковольтным и счетными модулями, которые также находятся в режиме ожидания команды.

Перед экспериментом заполняются параметры настройки систем анализатора: номер разряда, выбранный размер диафрагмы, устанавливаются пороги регистрации счетных модулей, задается временное окно и их количество, выбирается исследуемый изотоп и выставляются напряжения

высоковольтного модуля. После разряда происходит автоматический сброс напряжений высоковольтного модуля, считывание данных детекторов их обработка – расчет энергетических спектров атомов и определение температуры по их тепловой части – визуализация, сохранение. Далее заполняется экспериментальный журнал с параметрами разряда и комментариями. После этого программа возвращается в режим ожидания команды пользователя.

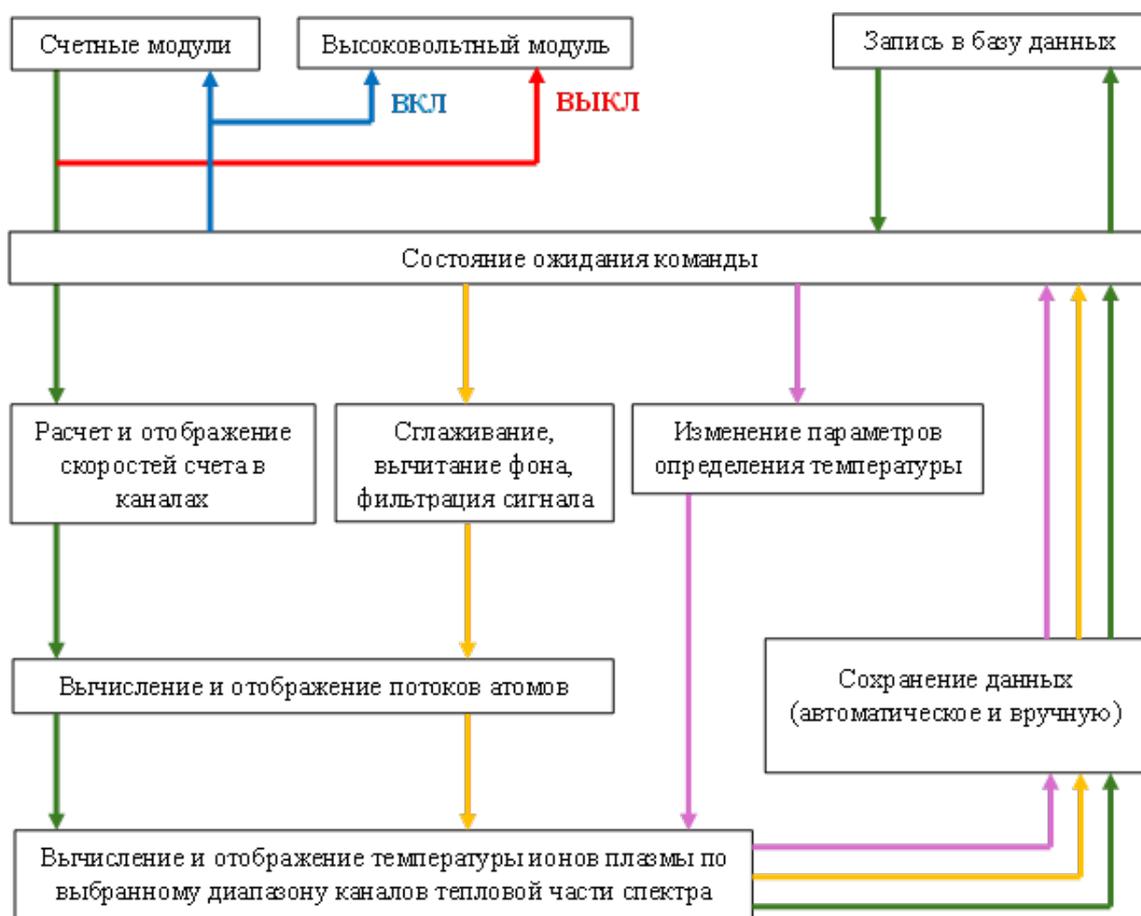


Рис. 2.2.1. Машина состояний программы анализатора CNPA-09

Помимо этого, в программе реализована возможность первичной обработки данных – выбор каналов для определения ионной температуры, сглаживание сигналов детекторов, фильтрация при помощи медианного фильтра и вычитание фона.

Вычитание фона было реализовано следующим образом: поскольку последний канал анализатора соответствует энергии 60 кэВ для дейтерия и 120 кэВ для водорода, а максимальная энергия инжекции составляет 50 кэВ,

отсчеты в этом канале, в основном, обусловлены регистрацией фоновых событий (преимущественно рентгеновского диапазона). Следовательно, чтобы учесть фон без потери полезных измерений можно использовать последний канал анализатора в качестве маркера фона и вычитать его отсчеты из отсчетов других каналов. Для этого была проведена серия экспериментов, в которой напряжение на пластинах электростатического дефлектора равнялось нулю. В таком режиме работы вторичные ионы не попадают в детекторный модуль и все события, регистрируемые детектором, являются фоновыми. В результате было получено типичное распределение фонового сигнала для всех каналов анализатора. Нормировка этого распределения на отсчеты последнего канала позволяет определить и учесть вклад фона в разряде, в котором производилось измерение полезного сигнала.

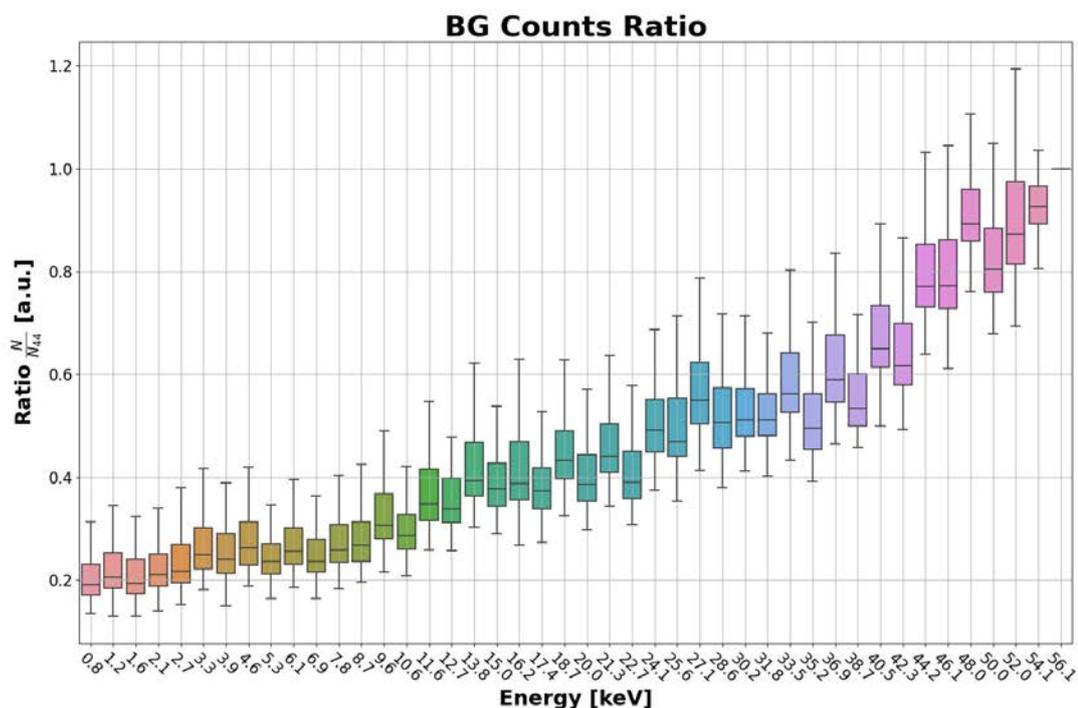


Рис. 2.2.2. Нормировка распределения фоновых событий в каналах анализатора на отсчеты в последнем канале

На рисунке 2.2.3 изображено основное окно программы анализатора. Условно его можно поделить на три части. Левая часть – блок со списком разрядов (1) и контроллеров для обработки измерений (2), панель настроек и

управления (3). Правая часть – осциллограммы скоростей счета каналов анализатора (4) и панель для масштабирования временной шкалы и выбора интересующей временной точки (5). Центральная часть включает в себя визуализацию энергетического спектра атомов перезарядки, зарегистрированных анализатором в выбранной временной точке (6), контроллеры каналов, выбранных для расчета температуры (7), и визуализацию временной эволюции ионной температуры, вычисленной по выбранным каналам энергетического спектра (8).

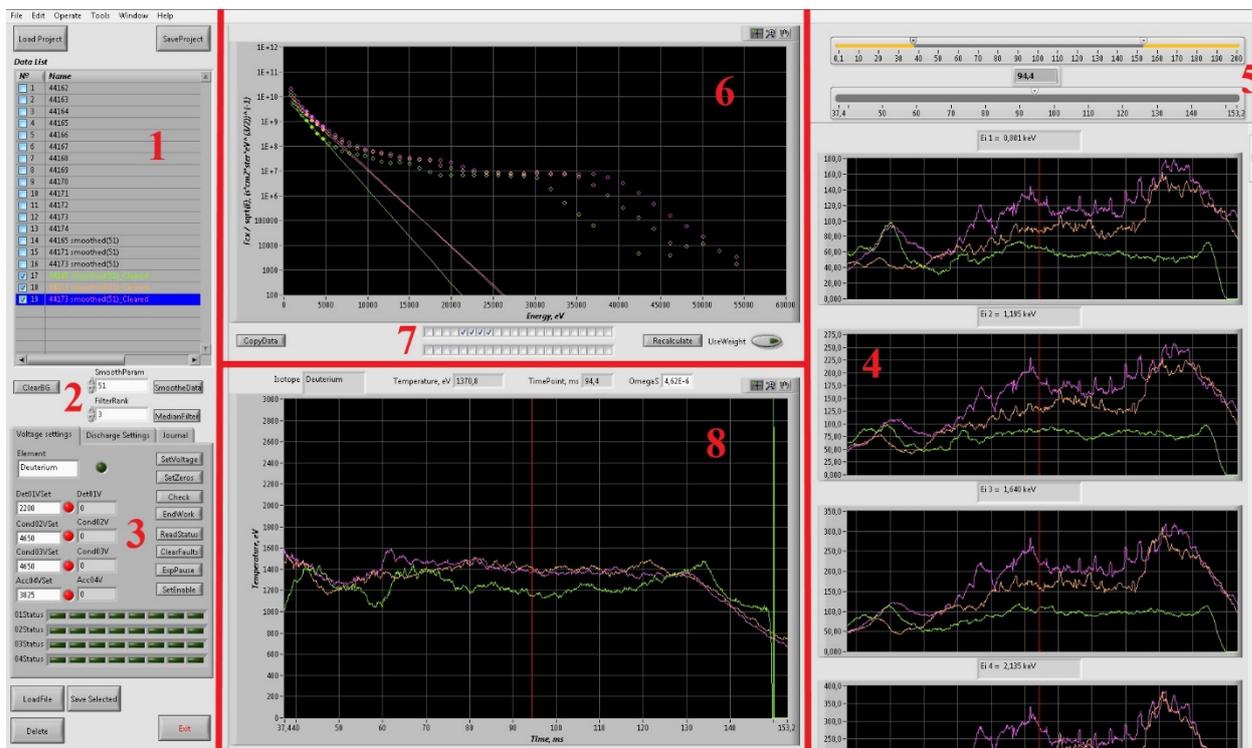


Рис. 2.2.3. Внешний вид программы управления и обработки данных анализатора CNPA-09

Таким образом, для анализатора CNPA-09 разработана программа, которая осуществляет управление прибором и позволяет получать предварительные результаты измерений энергетических спектров атомов перезарядки и ионной температуры во время эксперимента, а также проводить их обработку.

Глава 3. Экспериментальная апробация анализатора CNPA-09

3.1 Положение анализатора в диагностическом комплексе

На рисунке 3.1.1 проиллюстрировано актуальное положение диагностических систем и систем дополнительного нагрева токамака Глобус-М2 [25]. Анализатор CNPA-09 расположен в экваториальной плоскости токамака, направлен тангенциально, прицельный параметр равен прицельному параметру инжекторов НИ-1 и НИ-2 – 30 см.

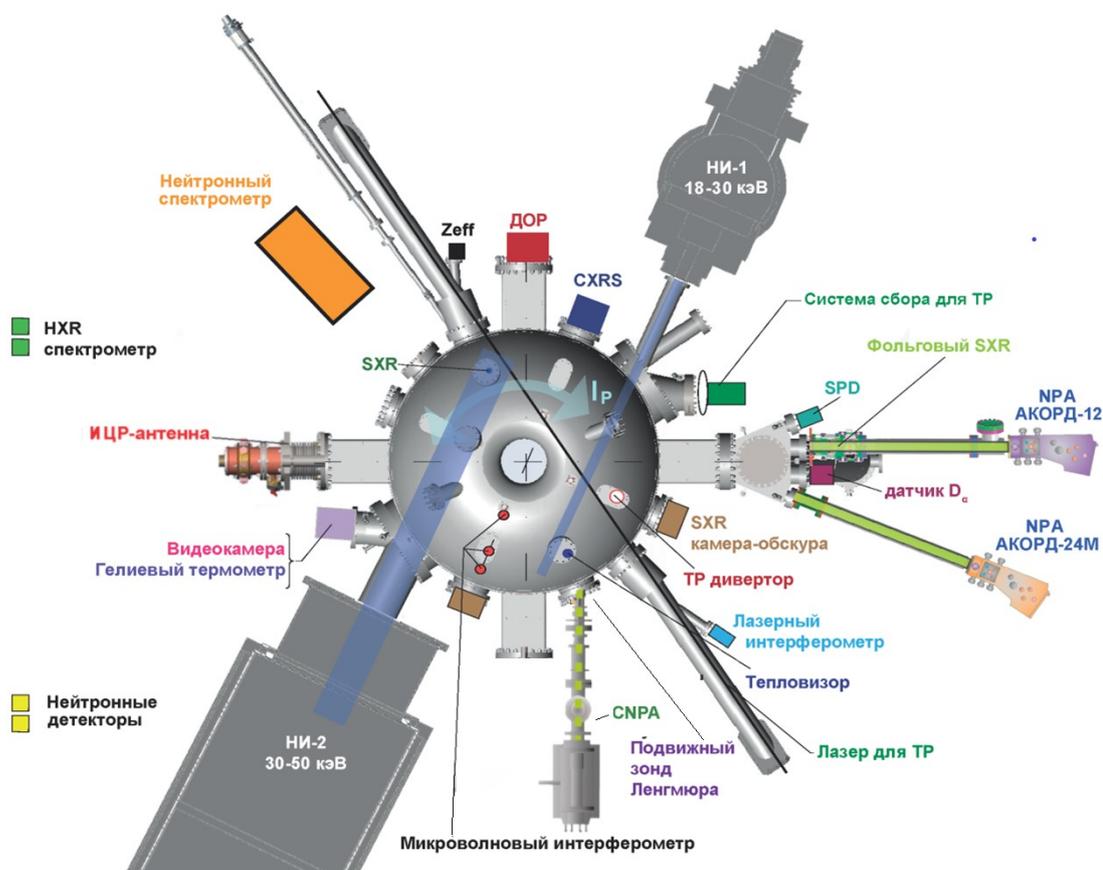


Рис. 3.1.1. Диагностический комплекс сферического токамака Глобус-М2

Данное положение CNPA-09 было выбрано в предположении, что анализатору будут доступны активные измерения на пучке НИ-1 для измерения энергетического спектра атомов перезарядки в продольном направлении.

Как упоминалось ранее, помимо CNPA-09 в составе диагностического комплекса установки работают 2 анализатора атомов перезарядки: АКОРД-12

и АКОРД-24М. Оба анализатора работают в активном режиме при включении инжектора НИ-1. Оба анализатора оснащены системами сканирования, которые позволяют осуществлять отклонения анализаторов АКОРД в вертикальном направлении перпендикулярно экваториальной плоскости на $\pm 10^\circ$. Для анализатора АКОРД-12 также есть возможность отклонения в горизонтальной плоскости на $\pm 10^\circ$. В таблице 3.1.1 представлены основные параметры анализаторов атомов перезарядки комплекса корпускулярной диагностики.

Таблица 3.1.1. Основные параметры анализаторов атомов перезарядки

Параметр	Значение параметра		
	АКОРД-12	АКОРД-24М	CNPA-09
Число энергетических каналов \times число изотопов	6 \times 2	12 \times 2	44 \times 1
Энергетический диапазон, кэВ для водорода для дейтерия	0,2-18 0,2-25	0,2-32 0,2-32	0,8-120 0,8-60
Динамический диапазон по энергиям	7		водород: 140 дейтерий: 70
Энергетическая ширина каналов, %	9-40	9-25	4-90
Массовое разделение	0.01		0.01-0.001
Временное разрешение, мс	0,1		

Оценка работы CNPA-09 проводилась путем сравнения результатов измерений спектров атомов перезарядки и определения ионной температуры с данными анализаторов АКОРД-12 и АКОРД-24М, а также с данными диагностики активной спектроскопии перезарядки (CXRS). Результаты сравнения приведены в следующем разделе.

3.2 Измерение спектров атомов перезарядки и ионной температуры плазмы

В качестве иллюстрации возможностей анализатора CNPA-09 на рисунке 3.2.1 изображен типичный энергетический спектр атомов перезарядки, измеренный в разряде с дейтериевой плазмой и дейтериевой инжекцией двух

нейтральных пучков с энергиями 45 и 30 кэВ соответственно. Прибор позволяет проводить измерения ионного компонента плазмы в диапазоне от тепловых до надинжекционных энергий за один плазменный разряд. Подробный энергетический спектр позволяет изучать особенности торможения быстрых частиц и поведение ионов с энергиями выше максимальной энергии инжекции – 50 кэВ. При помощи CNPA-09 впервые для токамака Глобус-М2 были экспериментально измерены спектры атомов перезарядки с энергиями выше 30 кэВ.

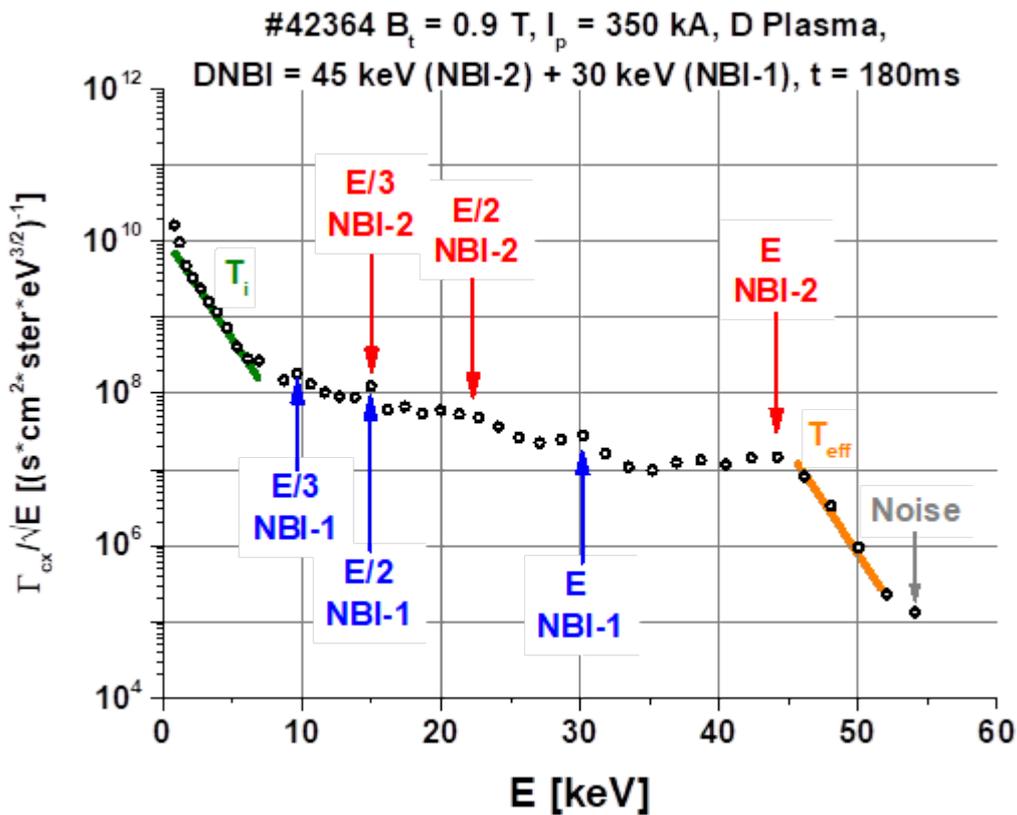


Рис. 3.2.1. Энергетический спектр атомов перезарядки при инжекции пучков НИ-1, НИ-2. Разряд №42364, 180 мс.

В рамках осенней экспериментальной кампании 2022 года на сферическом токамаке Глобус-М2 проводились измерения ионной температуры плазмы. Тепловая часть спектра позволяет определять ионную температуру плазмы. Оценка работы анализатора CNPA-09 в эксперименте была проведена в режимах с омическим нагревом плазмы и нагревом плазмы методом нейтральной инжекции одним и двумя пучками атомов высокой

энергии. При этом проводилось сравнение значений температуры ионов, полученное анализаторами CNPA-09, АКОРД-24, а также диагностикой CXRS в разрядах с инъекцией пучка НИ-1. В случае омического режима и режима с дополнительным нагревом при помощи инжектора НИ-2 оба анализатора работают в пассивном режиме и позволяют получать усредненное вдоль линии наблюдения значение температуры ионов. При этом, для определения ионной температуры используются спектры изотопа, который не инжектируется, чтобы уменьшить влияние тормозного спектра пучковых частиц на значение температуры.

На рисунках 3.2.2 и 3.2.3 представлена эволюция ионной температуры, полученная анализаторами CNPA-09 и АКОРД-24 в омическом разряде №41513 и разряде №42378 с инъекцией пучка НИ-2.

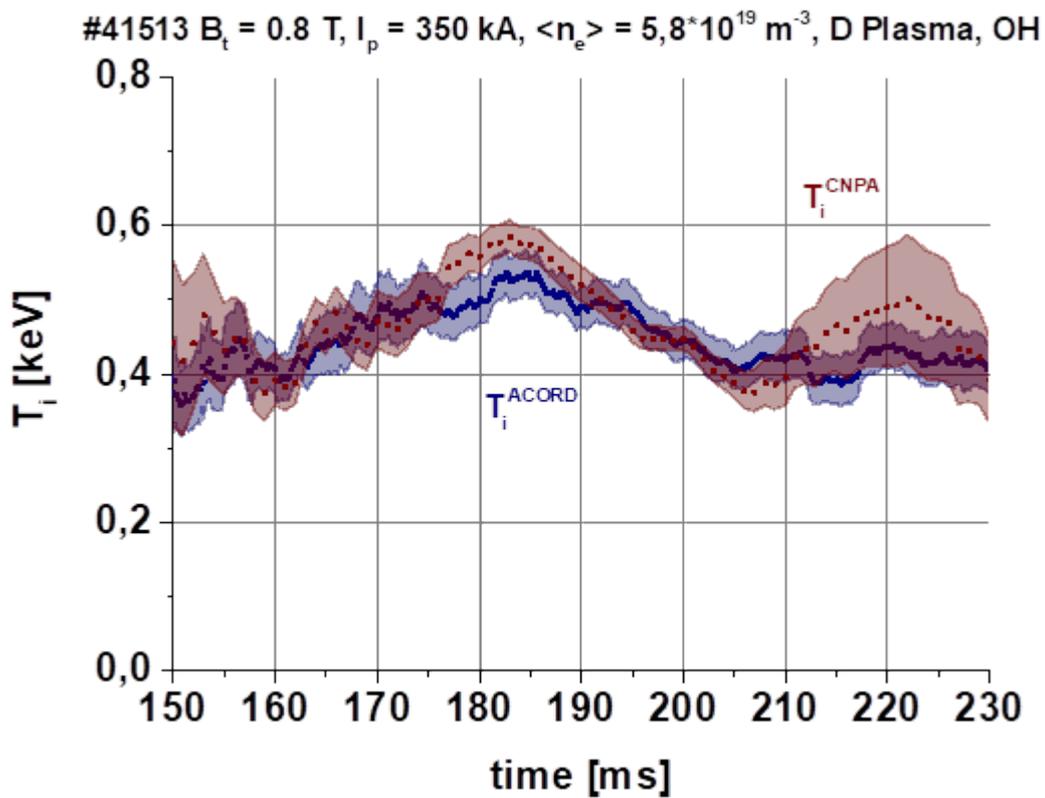


Рис. 3.2.2. Ионная температура плазмы в омическом разряде №41513.

Магнитное поле $B_t = 0,8$ Тл, ток плазмы $I_p = 350$ кА, среднее по экваториальной хорде значение электронной плотности $\langle n_e \rangle = 5.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Синие точки – значение температуры ионов, измеренное анализатором АКОРД-24М. Синяя область – ошибки измерения. Бордовые точки – значение температуры ионов, измеренное анализатором CNPA-09. Бордовая область – ошибки измерения.

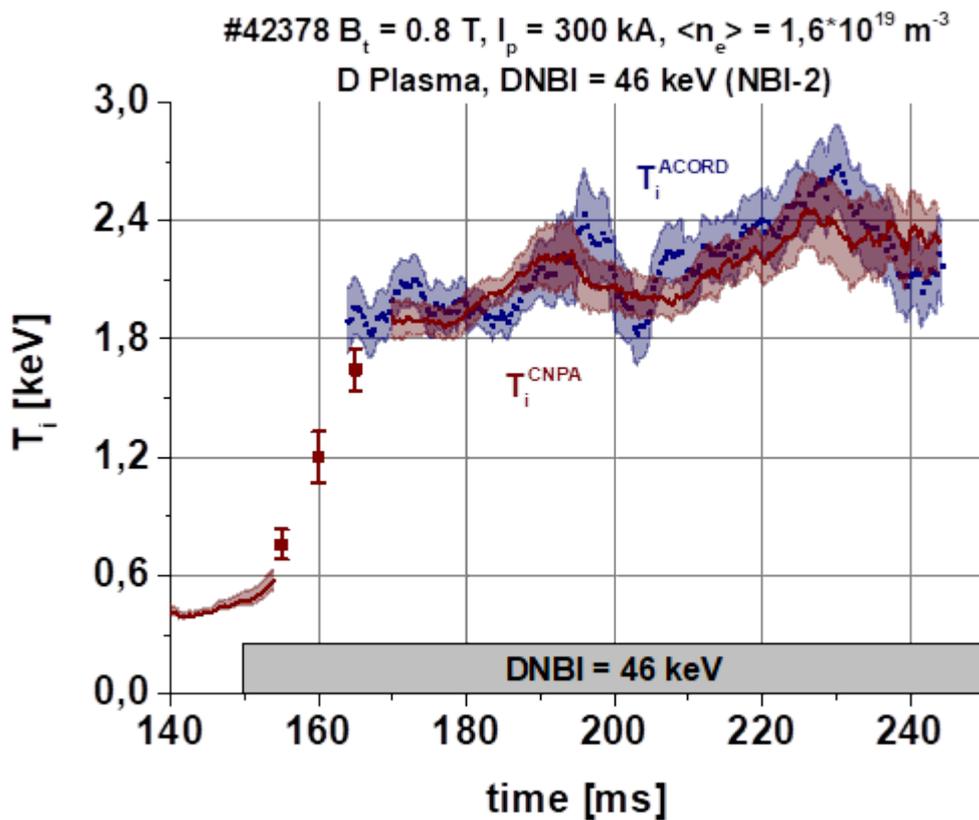


Рис. 3.2.3. Ионная температура плазмы в разряде 42378 с инжекцией пучка НИ-2. Магнитное поле $B_t = 0,8 \text{ Тл}$, ток плазмы $I_p = 300 \text{ кА}$, среднее по экваториальной хорде значение электронной плотности $\langle n_e \rangle = 1.6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Синие точки – значение температуры ионов, измеренное анализатором АКОРД-24М. Синяя область – ошибки измерения. Бордовые точки – значение температуры ионов, измеренное анализатором CNPA-09. Бордовая область – ошибки измерения. Серый прямоугольник – время работы инжектора НИ-2.

Как видно из графиков, значения ионной температуры, полученные анализаторами CNPA-09 и АКОРД-24М хорошо согласуются.

Другая ситуация наблюдается в режимах работы с инжекцией пучка НИ-1. В этом случае анализатор АКОРД-24М работает в активном режиме, в котором получает локальную информацию в точке пересечения линии наблюдения с линией инжекции ($R = 44 \text{ см}$). На рисунке 3.2.4 представлено сравнение ионной температуры, полученной анализаторами CNPA-09, АКОРД-24М и диагностикой CXRS. Как видно из графика, данные АКОРД и

CXRS хорошо согласуются, в то время как температура, полученная CNPA-09 ниже в 1.2 раза.

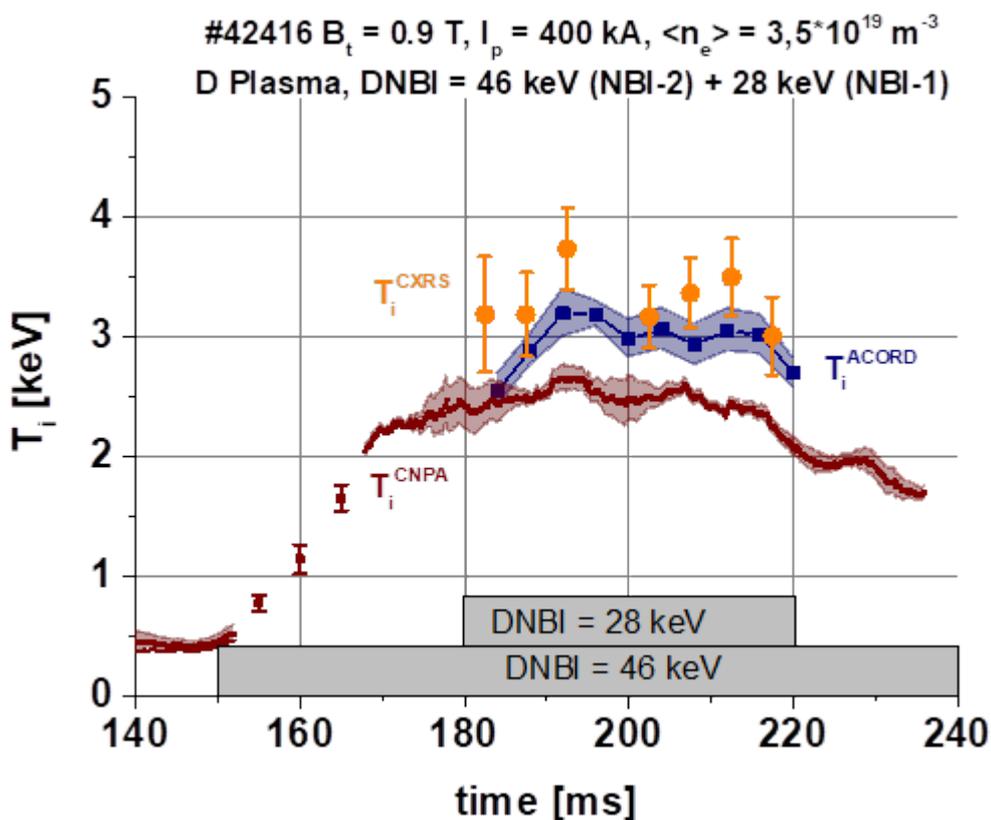


Рис. 3.2.4. Ионная температура плазмы в разряде 42416 с инжекцией пучков НИ-1 и НИ-2. Магнитное поле $B_t = 0,9$ Тл, ток плазмы $I_p = 400$ кА, среднее по экваториальной хорде значение электронной плотности $\langle n_e \rangle = 3.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Синие точки – значение температуры ионов, измеренное анализатором АКОРД-24М. Синяя область – ошибки измерения. Бордовые точки – значение температуры ионов, измеренное анализатором CNPA-09. Бордовая область – ошибки измерения. Оранжевые точки – значение центральной температуры ионов, измеренное диагностикой CXRS. Серые прямоугольники – время работы инжекторов НИ-1 и НИ-2.

Расхождение в значении ионной температуры можно объяснить отсутствием заметной активной мишени на линии наблюдения анализатора CNPA-09. В этом случае, анализатор, как в омическом режиме, так и при инжекции пучка НИ-2 работает в пассивном режиме. Так происходит, поскольку точка пересечения линии наблюдения анализатора и линии

инжекции находится на большом удалении от инжектора НИ-1, и пучок ионизируется раньше.

Моделирование кодом DOUBLE подтверждает выдвинутое предположение. На рисунке 3.2.5 представлен экспериментальный спектр атомов перезарядки, измеренный анализатором CNPA-09 и модельный спектр, полученный в коде DOUBLE для временной точки 202 мс разряда №42416.

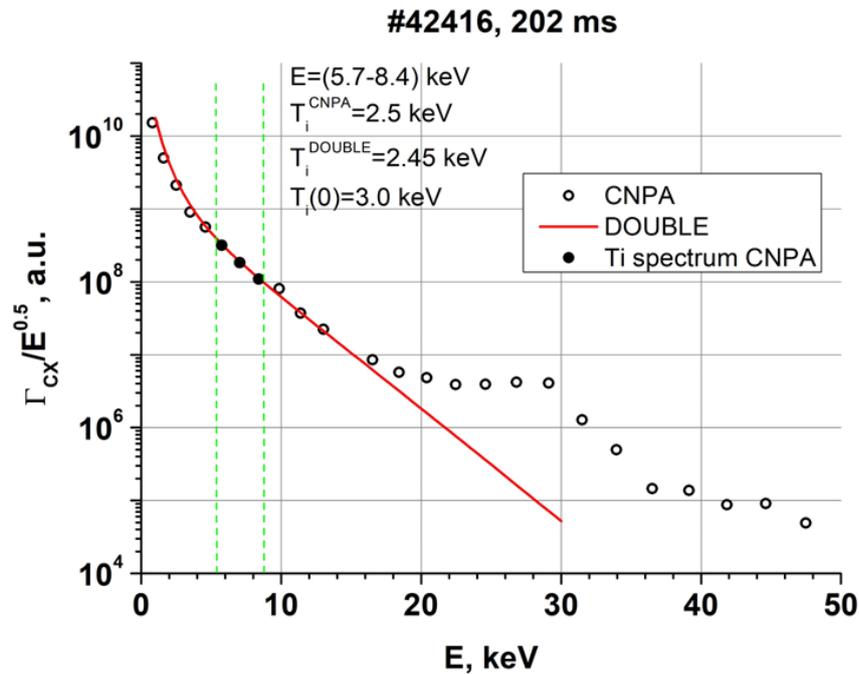


Рис. 3.2.5. Спектры атомов перезарядки, измеренные анализатором CNPA-09 и полученные при моделировании кодом DOUBLE. Разряд 42416, 202 мс. Выколотые черные точки – данные CNPA, красная линия – результат моделирования. Закрашенные черные точки – каналы CNPA-09 для определения температуры ионов Энергетический диапазон для определения температуры ионов по модельному спектру отмечен зеленым пунктиром.

Как видно из графика, температуры, определенные по выбранному энергетическому диапазону для эксперимента и полученные в результате моделирования, хорошо согласуются. При этом, центральная температура, полученная при моделировании, хорошо совпадает с температурой, полученной анализатором АКОРД и диагностикой CXRS в эксперименте. Расширение энергетического диапазона анализатора CNPA-09 для

определения центральной ионной температуры невозможно, поскольку заметно влияние тормозного спектра инжектированных частиц НИ-1. В случае наличия заметного количества нейтрали в области пересечения линии инжекции и линии наблюдения анализатора активный сигнал превышал бы пассивный сигнал и нивелировал бы влияние тормозного спектра.

В разрядах, где не производилось измерение ионной температуры, были получены экспериментальные спектры, измеренные анализаторами CNPA-09 и АКОРД-24М в надтепловом диапазоне энергий [25]. В этой серии экспериментов анализатор АКОРД-24М отклонялся от экваториальной плоскости для измерений в диапазоне $0.23 \leq \rho \leq 0.61$, где ρ – нормализованная магнитная координата. На рисунке 3.2.6 представлены спектры атомов дейтерия в разряде 42630 на 145 мс. Сигнал анализатора CNPA-09 – пассивный, проинтегрированный вдоль линии наблюдения, сигнал анализатора АКОРД-24М – активный, локализован в области $\rho = 0.46$. Подобная схема эксперимента может быть использована для одновременного анализа потоков, испускаемых из центральной и периферийной областей плазмы.

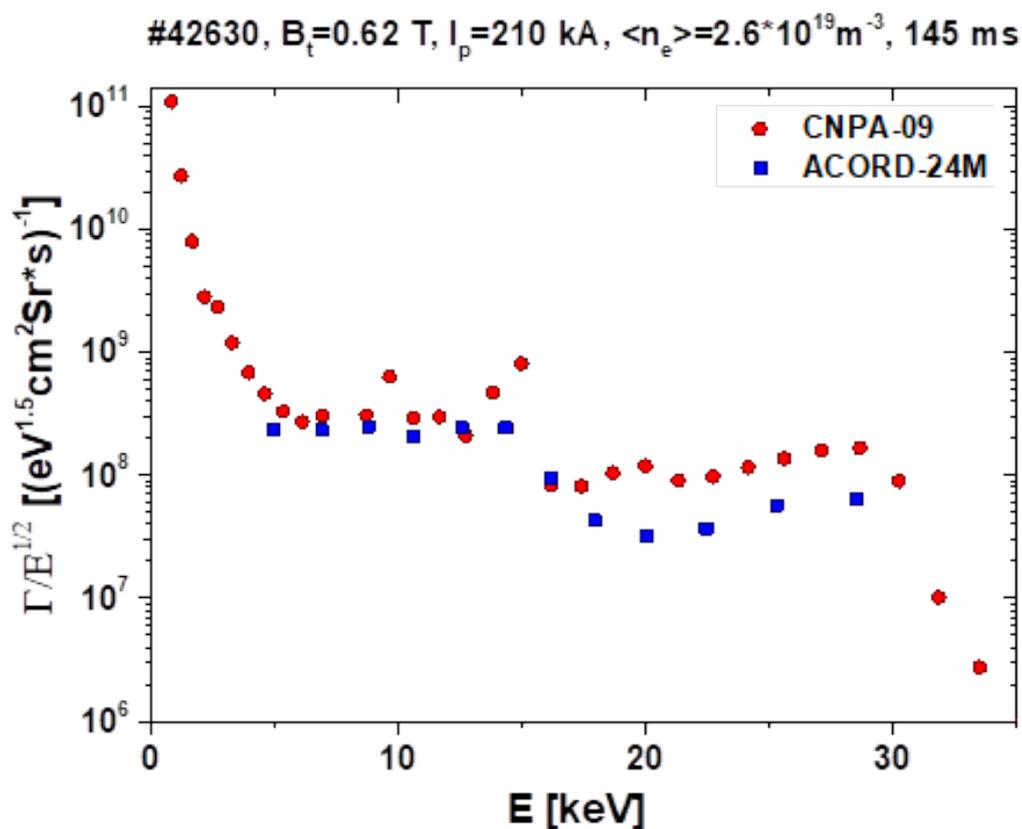


Рис. 3.2.6. Экспериментальные энергетические спектры атомов дейтерия.

Разряд 42630, 145 мс. Дейтериевая плазма, дейтериевая инжекция 28кэВ.

Магнитное поле $B_t = 0,62$ Тл, ток плазмы $I_p = 210$ кА, среднее по экваториальной хорде значение электронной плотности $\langle n_e \rangle = 2.6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Синие точки – пассивный сигнал анализатора CNPA-09. Зеленые точки – активный сигнал анализатора АКОРД-24М (наклон вниз на 6°).

Измерения в надтепловой области позволяют изучать поведение быстрых частиц, например, влияние неустойчивостей на их удержание. На рисунке 3.2.7 представлена вариация потока дейтерия высоких энергий анализаторов CNPA-09 и АКОРД-24М во время тороидальных альфвеновских мод (ТАЕ) в разряде 42641. АКОРД-24М измерял локальный периферийный сигнал ($\rho = 0.55$). Для анализа влияния неустойчивостей были выбраны каналы анализаторов с наиболее высоким уровнем сигнала – 28.6 кэВ для CNPA-09 и 22.4 для АКОРД-24М. Как видно из графика, события ТАЕ соответствуют падению пассивного сигнала CNPA-09, что косвенно свидетельствует о

потерях быстрых частиц. При этом локальный периферийный сигнал растет, что свидетельствует о транспорте быстрых частиц из центральной области в сторону границы плазмы.

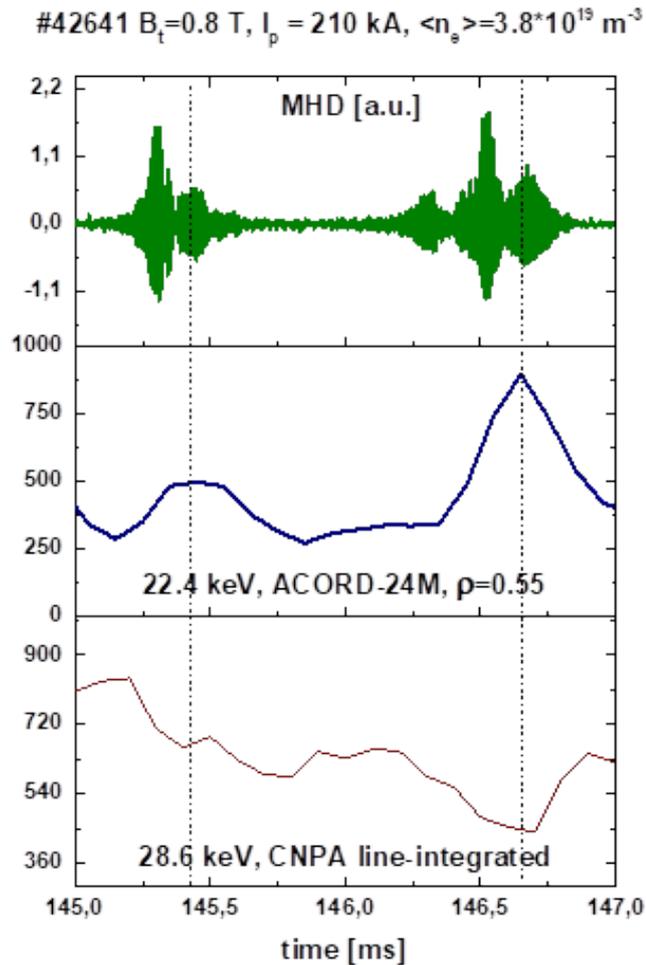


Рис. 3.2.7. Вариация потоков дейтерия в разряде 42641. Дейтериевая плазма, дейтериевая инжекция 28 кэВ. Магнитное поле $B_t = 0,8$ Тл, ток плазмы $I_p = 210$ кА, среднее по экваториальной хорде значение электронной плотности $\langle n_e \rangle = 3.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Сверху вниз: сигнал МГД-зонда; вариация потока атомов дейтерия 22.4 кэВ, измеренная анализатором АКОРД-24М; вариация потока атомов дейтерия 28.6 кэВ, измеренная анализатором CNPA-09. Пунктирными линиями отмечены моменты времени, соответствующие развитию тороидальных альфвеновских мод.

Помимо этого, благодаря широкому энергетическому диапазону CNPA-09, в разрядах с нейтральной инжекцией возможно изучение быстрых частиц

с энергиями выше инжекционной. Такие частицы возникают в плазме в результате столкновений быстрых ионов с ионами и электронами плазмы, что приводит к появлению высокоэнергичного хвоста в области надинжекционных энергий [26, 27]. Энергетический спектр таких ионов имеет вид:

$$F(E) \sim \exp(-E/T_{highE})$$

Здесь температура T_{highE} является сложной комбинацией ионной и электронной температур [28, 29]:

$$T_{highE} = \frac{T_i + (E/E_c)^2 T_e}{1 + (E/E_c)^2 \pm \tau_{se} 9.58 \times 10^{11} \frac{Z_b}{A_b} \frac{|\vec{E}^*|}{v_b} (E/E_c)^2}$$

В данном уравнении T_i и T_e – ионная и электронная температуры плазмы, Z_b и A_b – заряд и масса быстрых ионов, $|\vec{E}^*|$ – тороидальное электрическое поле, E_c – критическая энергия, при которой ионы и электроны получают одинаковую энергию от инжектированных частиц, которая определяется как:

$$E_c = 14.8 T_e A_b \left(\frac{[Z_i]}{A_i} \right)^{\frac{2}{3}}$$

где

$$\left(\frac{[Z_i]}{A_i} \right) = \frac{\sum_j n_j (Z_j^2 / A_j) \ln \Lambda_j}{n_e \ln \Lambda_e}$$

где $\ln \Lambda_j$ – кулоновский логарифм, а суммирование производится по всем сортам ионов, как плазменным и инжектированным, так и примесным. Время замедления на электронах τ_{se} выражается как [30]:

$$\tau_{se} = 6.27 \times 10^{14} \frac{A_b T_e^{\frac{3}{2}}}{Z_b n_e \ln \Lambda_e}$$

Информация о T_{highE} позволяет, например, при известной электронной температуре, оценить ионную температуру в разряде, в котором невозможно определить ионную температуру по тепловой части спектра из-за величины

пассивного сигнала. Либо, оценить электронную температуру, если имеется информация об ионной температуре.

В разряде 42364 с помощью анализатора CNPA-09 были проведены измерения спектра атомов перезарядки и определена температура T_{highE} по наклону спектра в области надинжекционных энергий (>45 кэВ). Эта температура сравнивалась с рассчитанным по формуле значением:

$$T_{highE}^{Calculated} = \frac{T_i^{AKOPD} + (E/E_c)^{\frac{3}{2}} T_e^{TS}}{1 + (E/E_c)^{\frac{3}{2}}}$$

где ионная температура определялась по данным анализатора АКОРД-24М, а электронная – по данным диагностики Томсоновского рассеяния на радиусе $R = 40$ см (центральная электронная температура). В формуле для $T_{highE}^{Calculated}$ был опущен член в знаменателе, соответствующий влиянию электрического поля, в силу его малой величины. На рисунке 3.2.8 представлено сравнение измеренного и рассчитанного значений температуры T_{highE} .

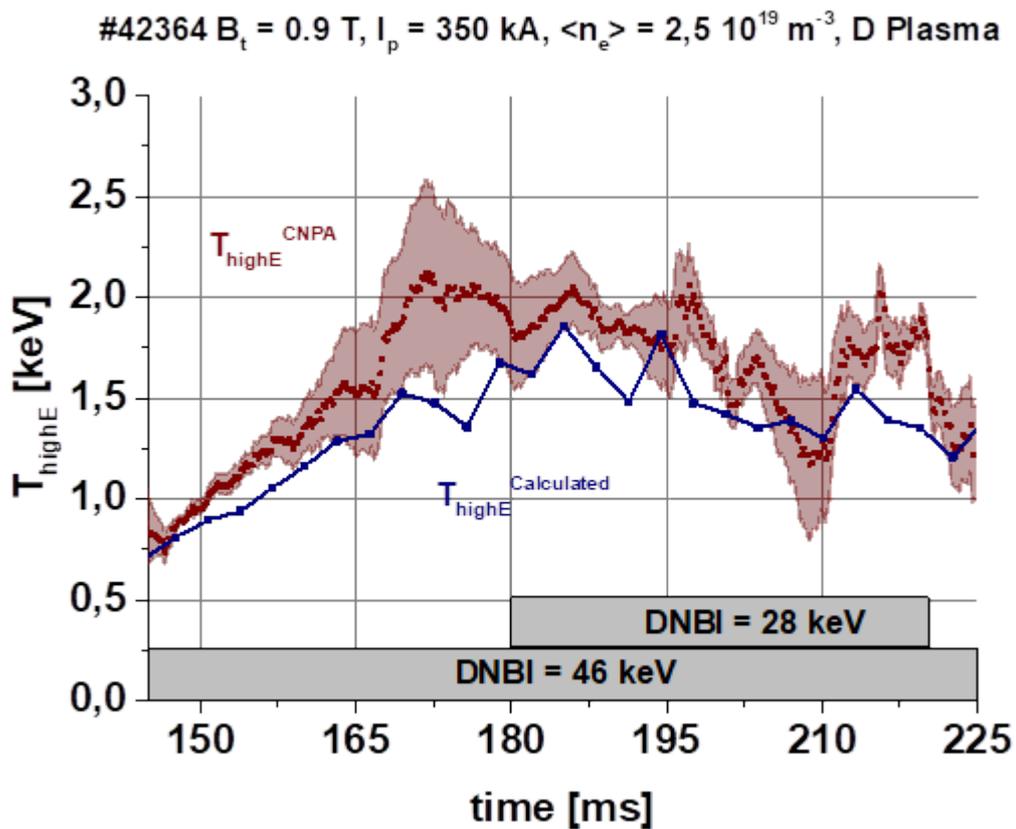


Рис. 3.2.8. Эволюция измеренного и расчетного значения T_{highE} . Разряд 42364, дейтериевая плазма, дейтериевая инжекция. Магнитное поле $B_t = 0,9$ Тл, ток плазмы $I_p = 350$ кА, среднее по экваториальной хорде значение электронной плотности $\langle n_e \rangle = 2.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Бордовые точки – значение T_{highE} , измеренное анализатором CNPA-09, бордовая область – ошибки измерения. Синие точки – значение T_{highE} , вычисленное с использованием данных анализатора АКОРД-24М и диагностики TS. Серые прямоугольники – время работы инжекторов НИ-1 и НИ-2.

Измеренное значение температуры T_{highE} несколько превышает рассчитанное, а поведение температур во времени схожее. Причины расхождения находятся в процессе изучения. Влияние может оказывать низкая уровень сигнала в каналах, по которым определялась температура, который дополнительно уменьшался за счет вычета фоновых событий. При этом ошибки измерения температуры не учитывают величину сигнала детекторов и включают в себя только ошибки, связанные с аппроксимацией методом наименьших квадратов. Помимо этого, расхождение может быть связано с

тороидальным вращением плазмы, влияние которого не учитывалось в рамках расчетов.

3.3 Новое положение анализатора

Поскольку в актуальном положении активные измерения для CNPA-09 доступны только в разрядах с низкой плотностью, в которых нейтральный пучок НИ-1 создает заметную перезарядочную мишень на линии наблюдения прибора, было решено провести перестановку диагностики. На данный момент проработано новое положение анализатора (рис. 3.3.1), в котором активные измерения будут осуществляться на пучке НИ-2. Возможности НИ-2 [31] позволяют инжектировать быстрые атомы на протяжении до 1 с, что обеспечит работу CNPA-09 в активном режиме на протяжении всего плазменного разряда Глобус-М2.

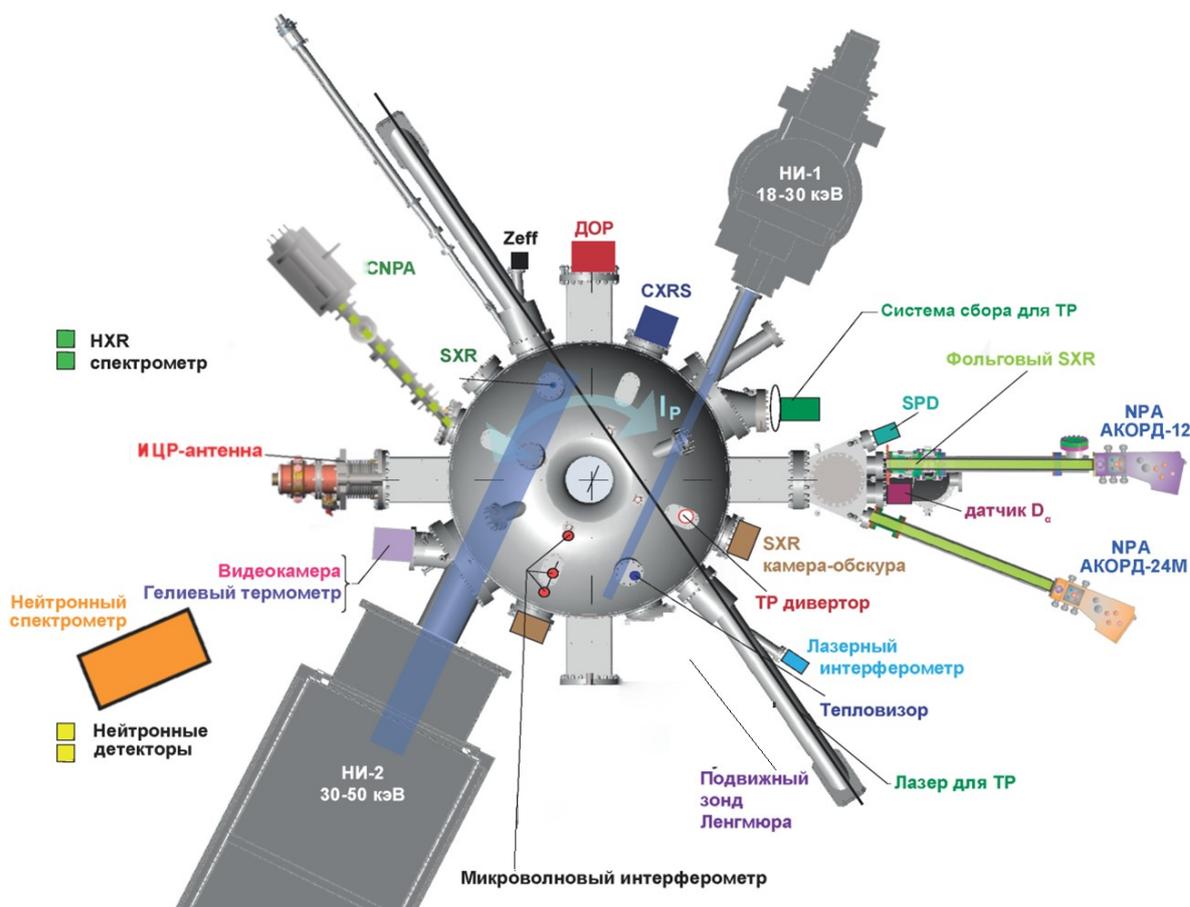


Рис. 3.3.1 Предложение по новому положению анализатора CNPA-09

Помимо этого, планируется оснастить анализатор CNPA-09 системой пространственного сканирования, которая позволит отклонять прибор горизонтальном и вертикальном направлениях на $\pm 15^\circ$.

Таким образом станет возможным измерение спектра атомов перезарядки в течение всего плазменного разряда в активном режиме в широком диапазоне по ρ и питч-углу быстрых частиц.

Заключение

В представленной к защите работе приведены материалы по изучению быстрых частиц на токамаке Глобус-М2 в разрядах с нейтральной инжекцией:

- Разработана программа управления для анализатора CNPA-09, которая обеспечивает работу прибора в эксперименте и позволяет проводить первичную обработку измерений непосредственно после разряда.
- Анализатор CNPA-09 внедрен в диагностический комплекс токамака Глобус-М2. Произведена экспериментальная апробация прибора, сравнение результатов измерений с данными других диагностик токамака демонстрирует хорошее совпадение.
- Проведено измерение спектров атомов перезарядки в широком диапазоне плазменных параметров. Исследованы особенности тормозного спектра быстрых частиц в разрядах с МГД-неустойчивостями. Исследована область спектра, соответствующая диапазону энергий выше инжекционной.

Публикации основных результатов

1. Петров Ю.В. и др. Диагностический комплекс сферического токамака Глобус-М2. 2023. Физика плазмы. Т.49. №12. С.1249-1270, <https://doi.org/10.31857/S036729212360084X>
2. Курскиев Г. С. и др. Режим с горячими ионами в сферическом токамаке Глобус-М2 // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – №. 4. – С. 305-321. <https://doi.org/10.31857/S0367292122601497>
3. Yu.V. Petrov et al 2022 Nucl. Fusion **62** 042009. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac27c7>

Список литературы

- [1] Население Земли. [Электронный ресурс] Счетчик населения Земли <https://countrysimeters.info/ru/World>
- [2] Зорин В. М. Атомные электростанции. Учебное пособие для вузов – Москва, Издательский дом МЭИ, 2012
- [3] Jassby D. L. Optimization of fusion power density in the two-energy-component tokamak reactor //Nuclear Fusion. – 1975. – Т. 15. – №. 3. – С. 453.
- [4] Бахарев Н. Н. Поведение быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М : дис. – Физ.-техн. институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 2016.
- [5] Гусев В. К. и др. Сферический токамак Глобус-М //Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69. – №. 9. – С. 58-62.
- [6] V.B. Minaev et al 2017 Nucl. Fusion 57 066047 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa69e0>
- [7] N.N. Bakharev, et al. // Nucl. Fusion 59 (2019) #112022 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab22dc>
- [8] V.B. Minaev, et al. // Proc. 46th EPS Conf. on Plasma Physics, Milan, 2019 ECA 43C P4-1084
- [9] Izvozchikov A.B. et al., Tech. Phys., 1992. V. 37. P. 201
- [10] N. N. Bakharev et al 2020 Plasma Phys. Control. Fusion 62 125010. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abbe32>
- [11] Chernyshev, F.V. et al. Particle Diagnostics of Ion Cyclotron Resonance Plasma Heating in the Globus-M Tokamak. Plasma Phys. Rep. 2009, 35, 903–911. <https://doi.org/10.1134/S1063780X09110014>
- [12] Bakharev, N.N., et al. Fast particle behaviour in the Globus-M spherical tokamak. Nucl. Fusion 2015, 55, 043023. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/4/043023>
- [13] Melnik, A.D. et al. Energy distributions of superthermal ions in regime with sawtooth oscillations during neutral beam injection at the Globus-M

- tokamak. // Plasma Phys. Rep. 43, 805–817 (2017).
<https://doi.org/10.1134/S1063780X17080086>
- [14] G F Avdeeva et al 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 666 012002.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/666/1/012002>
- [15] M.M. Larionova et al 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1400 077018.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077018>
- [16] Курские Г. С. и др. Модернизация диагностики томсоновского рассеяния на токамаке Глобус-М // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2012. – №. 2. – С. 81
- [17] Курские Г. С. и др. Измерение температуры электронов плазмы токамака Глобус-М2 методом мультитлазерного томсоновского рассеяния // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – №. 24. – С. 41-45. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.24.51799.19019>
- [18] Mironov M. I. et al. DOUBLE-MC code: modeling of neutral fluxes from plasma // Plasma Physics Reports. – 2021. – Т. 47. – С. 18-27.
<https://doi.org/10.1134/S1063780X21010104>
- [19] Vasiliev V.I., et al // On-line plasma shape reconstruction algorithm in tokamaks and its verification in the Globus-M // Nuclear Fusion. 2006. V. 46. P. S625. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/46/8/S08>
- [20] Киселев Е. О. и др. Расчет равновесия со свободной границей в сферическом токамаке Глобус-М2 с помощью кода PyGSS // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – №. 12. – С. 1357-1374.
<https://doi.org/10.31857/S0367292123601224>
- [21] Petrov Y. V. et al. Overview of GLOBUS-M2 spherical tokamak results at the enhanced values of magnetic field and plasma current // Nuclear Fusion. – 2022. – Т. 62. – №. 4. – С. 042009. <https://doi.org/10.3390/app13063430>
- [22] Балаченков И. М. и др. Первые наблюдения альфвеновских каскадов на токамаке Глобус-М2 и их применение для анализа минимума запаса устойчивости // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – №. 23. – С. 3-7. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.23.50338.18450>

- [23] Chernyshev, F.V et al. A Compact Neutral-Particle Analyzer for Plasma Diagnostics. // Instrum. and Exp. Tech. 2004, 47, 214–220. <https://doi.org/10.1023/B:INET.0000025204.01783.1a>.
- [24] Симонов С. Д. Калибровка анализатора потоков атомов CNPA-09 для токамака Глобус-М2: выпускная квалификационная работа бакалавра: направление 03.03. 02 «Физика»; образовательная программа 03.03. 02_01 «Физика атомного ядра и элементарных частиц». – 2021
- [25] Петров Ю.В. и др. Диагностический комплекс сферического токамака Глобус-М2. 2023. Физика плазмы. Т.49. №12. С.1249-1270, <https://doi.org/10.31857/S036729212360084X>
- [26] Cordey, J.G., Core, W.G.F., Phys. Fluids 17 (1974) 1626 <http://dx.doi.org/10.1063/1.1694943>
- [27] Goldston, R.J., Fast ion diagnostic experiment on ATC: Radially resolved measurements of q , Z_{eff} , $T_i(\text{parallel})$ and $T_i(\text{antiparallel})$, PhD Thesis, Princeton University, Princeton, NJ (1977)
- [28] S.S. Medley et al. // MHD-induced energetic ion loss during H-mode discharges in the National Spherical Torus Experiment // Nucl. Fusion 44 (2004) 1158–1175. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/44/11/002>
- [29] C.L. FIORE et al. // Ion temperature from tangential charge exchange neutral analysis on the Tokamak Fusion Test Reactor // Nucl. Fusion 28 1315 (1988). <https://doi.org/10.1088/0029-5515/28/8/001>
- [30] Spitzer L. Physics of fully ionized gases. – Courier Corporation, 2006
- [31] Щеголев П. Б. и др. Комплекс нейтральной инжекции сферического токамака Глобус-М2 // Физика плазмы. – 2023. – Т. 49. – №. 12. – С. 1293-1307. <https://doi.org/10.31857/S0367292123601261>