

Минобрнауки России

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г.

Новосибирск, 630090

телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63

<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su

ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136

ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

от 23 МАЙ 2019 № 15311 – 45/6215 - 988

на № _____ от _____

О направлении отзыва на диссертацию

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской
академии наук

академик РАН П. В. Яковлев

ПРИСТАВКА

«23»

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Корнева Владимира Александровича «**Исследование удержания быстрых ионов в компактном токамаке ТУМАН-3М с помощью измерения потоков нейтронов**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы»

Актуальность темы исследования

Актуальность работы определяется потребностью в получении новых экспериментальных данных на плазменных установках для продвижения к термоядерному реактору. Цель выполненной диссертационной работы вполне современна. Работа посвящена исследованию удержания быстрых ионов в плазме токамака при дополнительном нагреве. Нагрев с использованием инжекции атомарных пучков высокой энергии в настоящее время является перспективным для применения в реакторах управляемого термоядерного синтеза. Этот метод нагрева широко используется на многих крупных токамаках, таких как *PLT*, *TFTR*, *JET*, *JT-60*, *ASDEX Upgrade* и другие. Инжекционный нагрев плазмы будет основным и в сооружаемом в настоящее

время экспериментальном токамаке-реакторе *ИТЭР*. В диссертации использована нейтронная диагностика как один из наиболее информативных методов изучения захвата, удержания и дальнейшей термализации быстрых частиц инжектируемого пучка. Таким образом, исследования эффективности инжекционного нагрева плазмы в токамаке являются актуальными.

Работа выполнялась на токамаке ТУМАН-3М. В экспериментах решалась научная задача идентификации основных механизмов потерь быстрых ионов с помощью исследования зависимости потока нейтронов от ряда инженерных параметров установки, параметров плазмы и инжектируемого пучка. С этой целью осуществлялись измерения интегрального нейтронного выхода, образующегося при инжекции дейтериевого пучка в дейтериевую плазму, а также времени спада нейтронного потока после выключения инжекции, позволяющего оценить эффективность удержания быстрых ионов и их время жизни при различных параметрах плазмы и пучка.

Одним из важных направлений данной работы было установление эмпирической зависимости (скейлинга) величины интенсивности нейтронного потока от основных параметров установки, плазмы и инжектируемого пучка. Этот скейлинг может быть использован для прогнозирования величины нейтронного выхода при модернизации существующих компактных токамаков и при создании новых установок данного типа. Таким образом, актуальность представленного исследования не вызывает сомнений.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа хорошо структурирована, все главы логично связаны друг с другом и соответствуют поставленной цели научной работы. Диссертация содержит введение, четыре главы и заключение. В диссертации 122 страницы печатного текста, в том числе две таблицы, 53 рисунка и список литературы, состоящий из 100 наименований. Во введении обоснована

актуальность темы диссертационной работы, формулируется основная цель. В работе имеется обзор литературы по теме исследования. Он представлен в первой главе. В обзоре приводится описание инжектора быстрых атомов на положительных ионах. Отмечено, что инжекторы, которые планируется использовать в будущих токамаках-реакторах, будут оснащены ионными источниками на отрицательных ионах. Кратко изложены основы теории торможения быстрых ионов пучка в плазме и передачи мощности пучка электронной и ионной компонентам плазмы. Проводится анализ возможных каналов потерь мощности пучка при инжекционном нагреве плазмы. Далее описаны детекторы нейтронов, применяемые в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу в установках с магнитным удержанием. Обсуждены возможности применения нейтронной диагностики для исследования захвата и удержания быстрых ионов пучка в плазме токамака. Описаны источники нейтронов при нейтральной инжекции в плазму. Рассмотрены три механизма генерации нейтронов в плазме, которые могут наблюдаться в токамаке: термоядерный или тепловой механизм, мишенный механизм и пучковый механизм. Рассмотрены методики исследования зависимости эффективности захвата и удержания быстрых ионов от параметров плазмы и инжекционного пучка с помощью нейтронных измерений.

Результаты исследований, полученные лично автором, представлены в главах со второй по четвертую. Вторая глава посвящена созданию инжекционного комплекса на токамаке ТУМАН-3М. Подробно описан принцип работы нейтронного детектора, используемый на токамаке ТУМАН-3М. Представлена методика расчета нейтронного выхода. В третьей главе содержится описание экспериментов и анализ полученных данных на токамаке ТУМАН-3М. В ней представлены результаты исследований влияния различных параметров пучка и плазмы на захват быстрых частиц и их термализацию в плазме. Проведенные расчеты эффективности захвата

быстрых частиц пучка позволили оптимизировать параметры плазмы-мишени и нейтрального пучка для увеличения нейтронного выхода. Исследование поведения нейтронного выхода при различных значениях плотности плазмы показало, что при низкой плотности вплоть до значения $(2 - 2,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ потери быстрых ионов велики из-за неполного поглощения инжектируемого пучка. Исследование поведения нейтронного выхода в зависимости от величины плазменного тока и тороидального магнитного поля показало на значительное увеличение числа быстрых ионов в условиях повышенного магнитного поля. Было исследовано поведение нейтронного выхода в зависимости от энергии пучка. Время термализации быстрых ионов оценивалось из измерения времени спада нейтронного потока после выключения инжекции. Хорошее совпадение измеренного времени спада нейтронного потока с теоретическими предсказаниями указывает на отсутствие аномальных источников потерь быстрых ионов в описываемых экспериментах. В экспериментах с инжекцией высокоэнергичных нейтральных атомов на токамаке ТУМАН-3М обнаружено сильное влияние положения плазменного шнура вдоль большого радиуса на величину потока нейтронов и потока высокоэнергичных нейтральных атомов перезарядки. При смещении внутрь на 1 см наблюдался 20% рост нейтронного потока и двукратный рост потока высокоэнергичных атомов перезарядки. В четвертой главе представлен скейлинг зависимости нейтронного выхода от основных параметров разряда и пучка.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации

Содержание диссертации соответствует заявленной специальности 01.04.08 – «физика плазмы», поскольку проведены исследования на плазменной установке, разработаны методы диагностики плазмы, что содержится в паспорте специальности.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

В автореферате содержится достаточно полная информация об актуальности темы диссертации, её целях, определены положения, выносимые на защиту. Кратко изложено содержание диссертации и представлены основные результаты. Указан личный вклад автора и список публикаций по теме работы. Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание.

Личный вклад соискателя в получении результатов исследования

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии.

Степень достоверности результатов исследования

Полученные в ходе работы результаты экспериментально обоснованы. Их достоверность обеспечена многократным повторением измерений, сопоставлением результатов измерений с данными, полученными другими диагностическими средствами, и с результатами численного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

Главным научным результатом стало измерение и анализ поведения нейтронного выхода при разных параметрах инжектируемого пучка и плазмы. Для достижения этой цели были разработаны и введены в эксплуатацию комплекс инъекции пучка высокоэнергичных нейтральных атомов и нейтронная диагностика. Эти практические мероприятия позволили исследовать эффективность удержания быстрых частиц пучка в компактном токамаке. В ходе экспериментов с помощью нейтронной диагностики было показано, что удержание быстрых ионов и их термализация в плазме зависят от таких параметров плазмы и нейтрального пучка как величина плазменного

тока и тороидального магнитного поля, плотность и электронная температура плазмы, энергия быстрых ионов. Даны рекомендации по оптимизации параметров плазмы и инжектируемого пучка для получения максимального выхода нейтронного потока, которые могут быть применены не только в экспериментах на ТУМАНе-3М, но и на других термоядерных установках. В результате проведенных нейтронных измерений было показано, что термализация быстрых ионов в условиях компактного токамака проходит в соответствии с теорией кулоновских столкновений. Построенная на базе экспериментальных данных нейтронных измерений на токамаке ТУМАН-3М эмпирическая зависимость (скейлинг) величины нейтронного потока от основных параметров установки, плазмы и инжектируемого пучка позволяет прогнозировать величину нейтронного выхода при модернизации существующих компактных токамаков и при создании новых установок данного типа.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы в ФТИ им. А.Ф.Иоффе, НИЦ «Курчатовский институт», ИЯФ СО РАН, ИОФ РАН и других учреждениях и организациях, занимающихся проблемами физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза.

Новизна полученных результатов

1. На токамаке ТУМАН-3М создан инжекционный комплекс для исследования нагрева плазмы и генерации нейтронов. В диссертации подробно описана модернизация комплекса, которая позволила получить

разряды ионного источника и системы в целом длительностью до 60 мс, с оптимальной энергией нейтрального дейтериевого пучка $E_b = 23,5$ кэВ, при которой мощность, вводимая в плазму, составляла $P_b = 380$ кВт. Компьютеризированная система управления и сбора данных инжектора, созданная на основе современных АЦП, позволила надежно регистрировать все необходимые параметры разряда инжектора в широком диапазоне напряжений и времен. С помощью современных ЦАП и цифровых каналов управления создано и успешно внедрено дистанционное управление параметрами пучка.

2. Разработанная нейтронная диагностика, использующая два детектора для регистрации 2,45 МэВ нейтронов на основе ^3He -газоразрядных счетчиков и высокочастотные АЦП, позволяет измерять нейтронные потоки со скоростью счета свыше 10^5 с^{-1} .
3. Для выбора оптимальных параметров инжекции, величины тороидального магнитного поля и параметров плазменного шнура были проведены численные расчеты зон захвата быстрых частиц и эффективности поглощения мощности пучка в плазме. Результаты расчетов обосновали возможность эффективного нагрева ионов плазмы пучком быстрых атомов в компактном токамаке ТУМАН-3М.
4. С помощью нейтронной диагностики впервые на токамаке ТУМАН-3М было подробно исследовано влияние различных параметров инжектируемого пучка и мишенной плазмы на захват быстрых частиц и их термализацию. Экспериментально определена минимальная плотность плазмы, при которой пучок инжектируемых частиц с заданной энергией полностью ионизируется. Для условий ТУМАНа-3М эта плотность составляет $(2 - 2,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Обнаружен быстрый рост нейтронного выхода R_n при увеличении энергии инжекции E_b в диапазоне 14-21 кэВ. Причем при тороидальном магнитном поле $B_t = 1$ Тл и плазменном токе $I_p = 180$ кА рост R_n быстрее, чем при $B_t = 0,7$ Тл и $I_p = 140$ кА. Различие величин нейтронного выхода в этих сценариях связано с увеличением количества

захватываемых быстрых частиц в результате увеличения зоны захвата при больших полях и токах. При смещении плазменного разряда внутрь вдоль большого радиуса на $\Delta R = 1$ см был обнаружен 20% рост нейтронного выхода и двукратный рост потока высокоэнергичных атомов перезарядки, обусловленные увеличенной зоной захвата быстрых ионов.

5. Впервые на токамаке ТУМАН-3М в разрядах с инжекцией пучка по току плазмы при высокой плотности были наблюдаемы высокочастотные МГД вспышки, типа “*sawbone*”. Нейтронные измерения показали, что в условиях токамака ТУМАН-3М заметного влияния на удержание быстрых ионов возмущения “*sawbone*” не оказывают. При инжекции нейтрального пучка по направлению тока в плазме обнаружено существенное увеличение периода и амплитуды пилообразных колебаний интенсивности мягкого рентгена. Рост амплитуды и периода пилообразных колебаний интенсивности мягкого рентгена указывает на частичную “стабилизацию пилы” быстрыми ионами.
6. На основе созданной базы данных предложен эмпирический закон масштабирования (скейлинг) величины нейтронного выхода с изменением основных параметров мишенной плазмы и инжектируемого атомарного пучка. Скейлинг можно использовать для прогнозирования величины нейтронного выхода при модернизации существующих компактных токамаков и при создании новых установок данного типа.

Замечания по диссертационной работе

Положительно характеризуя работу в целом, можно сделать следующие замечания:

1. На странице 53 говорится, что «вероятность потерь отсчетов из-за наложения импульсов не превышает 1%», но не указывается, при какой скорости счета. Если при максимальной в 10^6 с⁻¹, то эта величина сомнительна.

2. В диссертации не описан метод разделения наложенных импульсов в нейтронном детекторе, но декларируется максимальная скорость счета 10^6 с^{-1} . Анализ рисунка 20 на странице 54 показывает, что при имеющемся уровне шумов эта величина недостижима.
3. Не анализируется вклад рассеянных нейтронов в сигнал и не приводится методика и результаты калибровки детектора.
4. Недоработки, указанные выше, не позволяют читателю определить точность абсолютной величины скейлинга, приведенного на странице 103, а в диссертации эта точность не обсуждается.
5. Диссертация не свободна от досадных опечаток и неточностей. На странице 16 в формуле 1 не ясно по какому индексу идет суммирование, поскольку i -не индекс, а обозначение в плотности ионов. На странице 53 подпись к рисунку 19 не соответствует содержанию рисунка. На странице 57 абзац текста в точности повторяет абзац со страницы 54.

**Заключение по диссертации о соответствии ее требованиям
«Положения о порядке присуждения ученых степеней» по пунктам 9 и
10.**

Диссертационная работа В.А. Корнева «**Исследование удержания быстрых ионов в компактном токамаке ТУМАН-3М с помощью измерения потоков нейтронов**» является завершенным научным исследованием по актуальной тематике. Несмотря на сделанные замечания, работа выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне. Результаты проведенных автором исследований захвата и удержания быстрых частиц в плазме с помощью нейтронного детектора представляют как

научный, так и практический интерес. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации.

Работа соответствует требованиям ВАК и, в частности, п. 9 «Положений о порядке присуждения ученой степени» (постановление Правительства Российской Федерации № 842 в редакции от 24.09.2013 года), а ее автор – Корнев Владимир Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Результаты диссертационной работы Корнева В.А. были представлены и обсуждены на семинаре плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета плазменных лабораторий ИЯФ СО РАН 23.05.2019г., протокол № 17.

Председатель Ученого совета

д. ф.-м. н

—А.А.Иванов

Заключение составлено:

Бурдаков Александр Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, советник директора ИЯФ СО РАН, заведующий лабораторией №10, +7 (383) 329-46-02, 630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11; A.V.Burdakov@inp.nsk.su

Подпись Бурдакова Александра Владимировича заверяю.

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН,

к.ф.-м.н.

Аракчеев А.С.