

На правах рукописи

КОРНЕВ Владимир Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ УДЕРЖАНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ
В КОМПАКТНОМ ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М
С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Специальность 01.04.08 – физика плазмы

Санкт-Петербург
2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:	Лебедев Сергей Владимирович доктор физико-математических наук, Зам. директора по научной работе ФТИ им. А.Ф. Иоффе
Официальные оппоненты:	Кутеев Борис Васильевич доктор физико-математических наук, профессор, Зам. руководителя отдела токамаков ККТЭПТ НИЦ «Курчатовский институт» Кашук Юрий Анатольевич кандидат физико-математических наук, Нач. отдела нейтронной и спектроскопической диагностики ЧУ «Проектный центр ИТЭР» ГК Росатом
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 13.06.2019г. в 16:00
на заседании диссертационного совета Д 002.205.03 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе
по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе и на
сайте института: <http://www.ioffe.ru>

Автореферат разослан _____ 2019г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.205.03,
кандидат физ.-мат. наук

А.М. Красильщиков

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Основными задачами, решаемыми в исследованиях по магнитному удержанию плазмы, являются обеспечение равновесия и устойчивости плазмы, ее нагрев, удержание энергии и частиц. Первые значимые результаты по магнитному удержанию были достигнуты на токамаке T-3 [1], где с помощью омического нагрева была получена устойчивая плазма с электронной температурой 1000 эВ, ионной температурой до 500 эВ и плотностью $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Однако, как показывают расчеты и эксперименты, нагреть плазму в токамаке до температуры зажигания термоядерной реакции ($\sim 20 \text{ кэВ}$) с помощью исключительно омического нагрева невозможно. В связи с этим, одной из центральных проблем физики систем с магнитным удержанием является оптимизация дополнительного нагрева плазмы. Наиболее перспективным для применения в реакторах управляемого термоядерного синтеза представляется нагрев с использованием инъекции атомарных пучков высокой энергии. 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*. Таким образом, разработка методов исследования эффективности инжекционного нагрева плазмы в токамаке является актуальной задачей.

Одним из наиболее информативных методов изучения захвата, удержания и дальнейшей термализации быстрых частиц инжектируемого пучка является нейтронная диагностика. Источником нейтронов в термоядерных установках являются термоядерные реакции, в которых одним из продуктов являются нейтроны МэВ диапазона энергий. Нейтроны не участвуют в нагреве плазмы, так как не удерживаются магнитным полем и практически мгновенно уходят из разряда, поскольку слабо взаимодействуют с частицами разреженной плазмы установок с магнитным удержанием. Скорости термоядерных реакций и соответствующие потоки нейтронов зависят от относительной скорости сталкивающихся частиц и плотности плазмы. Таким образом, с одной стороны нейтронные потоки служат в качестве надежной диагностики быстрых ионов в плазме и с другой стороны отражают эффективность работы реактора УТС.

Обсуждаемые в последнее время проекты сооружения компактных термоядерных источников нейтронов для гибридных «синтез-деление» реакторов дополнительно усилили интерес к изучению закономерностей поведения потоков нейтронов в токамаке [2]. Создание таких нейтронных источников и реакторов на их основе позволит снизить остроту проблемы взаимодействия плазмы с первой стенкой токамака-реактора за счет снижения требований к мощности термоядерного реактора при использовании усиления в blankets, содержащем тяжелые делящиеся элементы. Источники термоядерных нейтронов являются необходимым шагом на пути создания гибридных реакторов. Другими применениями термоядерного нейтронного источника являются переработка отработанного ядерного топлива, наработка топлива ^{239}Pu и ^{233}U для тепловых реакторов, радиационная медицина, материаловедение. Для построения эффективного нейтронного источника на основе токамака требуется оптимизация

геометрии установки, величин тороидального магнитного поля и плазменного тока, других плазменных параметров и параметров систем инжекции энергичных нейтралов.

Представленная работа направлена на изучение захвата и удержания быстрых ионов при инжекции высокоэнергичного атомарного пучка дейтерия в дейтериевую плазму компактного токамака. Работа выполнялась на токамаке ТУМАН-3М [3]. 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 настоящего исследования не вызывает сомнений.

Основной целью настоящей работы было исследование влияния параметров пучка и плазмы на удержание быстрых ионов, возникающих при применении дополнительного пучкового нагрева плазмы.

В ходе работы необходимо было решить следующие задачи:

- подготовить комплекс нейтральной инжекции к экспериментам на токамаке ТУМАН-3М, посвященным исследованиям нагрева плазмы и закономерностей генерации нейтронов в компактном токамаке;
- разработать и создать нейтронную диагностику на токамаке ТУМАН-3М;
- выполнить исследование удержания быстрых ионов в плазме с помощью нейтронной диагностики;
- осуществить сравнение закономерностей поведения интенсивности нейтронного потока с теоретическими представлениями, разработать скейлинг интенсивности нейтронного потока в компактном токамаке.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Создание комплекса инжекционного нагрева плазмы на токамаке ТУМАН-3М для исследования закономерностей генерации нейтронов и изучения физики дополнительного нагрева плазмы в компактном токамаке.
2. Разработка и создание нейтронной диагностики на токамаке ТУМАН-3М.
3. Результаты исследования параметрических зависимостей удержания быстрых ионов от характеристик плазмы и инжектируемого пучка с помощью анализа нейтронных потоков в токамаке ТУМАН-3М.
4. Скейлинг потока термоядерных DD нейтронов в компактном токамаке.

Научная новизна работы.

Впервые в России подробно исследовано поведение нейтронного потока в плазме с инжекцией интенсивного нейтрального пучка атомов в зависимости от

различных параметров разряда и пучка. В условиях токамака ТУМАН-3М разработанная нейтронная диагностика оказалась наиболее надежным и эффективным средством исследования удержания быстрых ионов, образующихся при ионизации энергичных атомов дейтерия в плазме.

Создана обширная база экспериментальных данных поведения быстрых частиц и обусловленного ими нейтронного излучения при нейтральной инжекции в компактном токамаке ТУМАН-3М. На основе созданной базы данных, предложен новый скейлинг, описывающий параметрическую зависимость нейтронного выхода от основных параметров установки, плазмы и инжектируемого пучка.

Научная и практическая значимость работы

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 инжекции 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 [4]. 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.

Достоверность научных результатов

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.

Апробация работы и публикации

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены в период 2004-2018 гг., изложены в 13 печатных работах, автором и соавтором которых является В.А. Корнев, в том числе 8 статей в рецензируемых журналах. Результаты, изложенные в диссертации, неоднократно представлялись автором на различных конференциях и совещаниях: Конференции Европейского физического общества по физике плазмы (2005, 2007, 2008, 2010, 2018), Звенигородской (международной) конференции по физике плазмы и УТС (2004, 2005, 2006, 2008, 2009), на Международной Конференции МАГАТЭ по термоядерной энергии (2014, 2016), на совместных симпозиумах,

проводимых Калэмским (Culham) научным центром (Великобритания) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе, а также Helsinki Aalto University of Technology (Финляндия) и ФТИ им. А.Ф. Иоффе, на семинарах лаборатории физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Структура и объем диссертации

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.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии. Автором предложена и разработана схема эксперимента по нейтральной инжекции на токамаке ТУМАН-3М. Автор лично принимал участие в модернизации инжектора. Разработанная архитектура компьютерного управления параметрами разряда в газоразрядной камере и системы сбора данных в целом значительно повысила эффективность работы инжектора и токамака.

Для изучения физики торможения и удержания быстрых ионов в плазме на токамаке ТУМАН-3М автором была разработана и построена нейтронная диагностика, состоящая из двух детекторов для измерения выхода нейтронов с энергией 2,45 МэВ и оригинальной системы регистрации сигналов детекторов, позволяющей надежно измерять нейтронные потоки со скоростью счета до 10^5 - 10^6 с⁻¹.

При непосредственном участии автора была сформулирована и решена задача моделирования зон захвата быстрых ионов и эффективности передачи мощности инжектируемого пучка плазме в зависимости от параметров пучка и плазмы. На основе результатов моделирования и результатов обработки экспериментальных данных автором предложены оптимальные параметры инжектируемого пучка и мишенной плазмы для достижения максимального нейтронного выхода на токамаке ТУМАН-3М.

Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируется основная цель.

В **первой Главе (параграф 1.1)** дан обзор результатов использования инжекторов нейтральных атомов для нагрева плазмы и генерации нейтронов в различных токамаках. Отдельное внимание в этом разделе уделено описанию конструкции инжектора на положительных ионах, формированию интенсивного ионного пучка, проблемам транспортировки нагревного пучка в плазму. 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, в **параграфе 1.2** описаны детекторы нейтронов, применяемые в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу в установках с магнитным удержанием. Рассмотрены принципы действия различных типов нейтронных детекторов. Описан нейтронный детектор на базе пропорционального счетчика с

газовым наполнением (^3He), аналогичный использованному при выполнении диссертационной работы. ^3He -газоразрядный счетчик обладает большой эффективностью регистрации нейтронов за счет использования ядерной реакции $^3\text{He}(n,p)T$. Эффективность регистрации нейтронов детектором данного типа выше, чем у детектора с пропорциональным счетчиком на базе газа BF_3 .

В **параграфе 1.3** 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.

Параграф 1.4 посвящен обсуждению проблем создания мощных нейтронных источников на базе токамака и возможностям применения таких источников в различных областях экономики. Изложены физические принципы и особенности таких нейтронных источников. Сформулированы достоинства и трудности создания нейтронного источника большой мощности.

Вторая Глава посвящена разработке и созданию комплекса нейтральной инжекции токамака ТУМАН-3М и подготовке экспериментов по исследованию нейтронных потоков. В начале **второй главы (параграф 2.1)** приведено описание токамака, представлены основные его параметры. Здесь же описаны основные диагностические системы, использованные при работе над диссертацией.

В **параграфе 2.2** представлено описание комплекса нейтральной инжекции. Изложена схема работы инжектора быстрых частиц, использованного в экспериментах [5]. Для проведения экспериментов с дополнительным нагревом плазмы был доработан, модернизирован, испытан на стенде и оборудован новой системой технологических диагностик инжектор высокоэнергичного пучка изотопов водорода, ранее применявшийся в экспериментах на установке Т-11 [6]. В инжекторе использовались два ионных источника: ИПМ-2 (Источник с Периферийным Магнитным полем) или его более мощный аналог ИПМ-1. Данные ионные источники позволили получить пучки с энергией до 30 кэВ и максимальной мощностью до 600 кВт на протии и до 400 кВт на дейтерии [5]. Приведены основные параметры ИПМ-2 и ИПМ-1.

Особое внимание уделено модернизации некоторых узлов инжектора. Электромагнитный клапан подачи рабочего газа в газоразрядную камеру был заменен пьезоэлектрическим, что позволило производить корректировку тока пучка во время разряда. Также было осуществлено усовершенствование системы электропитания инжектора, созданы новые системы управления и сбора технологических и экспериментальных данных.

Представлены результаты стендовых калориметрических измерений коэффициента нейтрализации ионного пучка в инжекторе для всего рабочего диапазона мощностей, результаты зондовых измерений профиля пучка в вертикальном и горизонтальном направлениях, измерения энергетического и массового состава пучка

по интенсивности доплеровских линий свечения D_α . Подробно описаны схема компьютерного управления работой инжектора и система сбора данных.

В разделе 2.2.2 отдельно описаны особенности ионного источника ИПМ-1. Перечислены конструктивные переделки в конструкции инжектора, осуществленные при переходе с ИПМ-2 на более мощный источник ИПМ-1.

В параграфе 2.3 обсуждена схема измерения интенсивности нейтронного потока, образующегося в результате DD -реакции. Приведены основные характеристики разработанных нейтронных детекторов. Используемые в экспериментах нейтронные детекторы состоят из ^3He -газоразрядного счетчиков и полиэтиленовых замедлителей, в которых нейтроны с энергией 2,45 МэВ тормозятся до тепловых энергий. Данный тип детектора позволяет регистрировать нейтроны с энергией от 1 до 10 МэВ. Описан метод расчета интегрального нейтронного выхода по данным разработанной диагностики.

В третьей Главе (параграф 3.1) представлены основные результаты нагрева плазмы инжекционным способом на токамаке ТУМАН-3М [A1, A2]. Продемонстрировано положительное влияние боронизации разрядной камеры на величину эффективного заряда плазмы в стадии инжекционного нагрева – заряд понижался до величины 1,6. В разряде со следующими параметрами $B_t = 1$ Тл, $I_p = 183$ кА, $n_e = 3,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ был получена максимальная ионная температура $T_i(0) = 350$ эВ, был зарегистрирован максимальный выход нейтронов $R_n = 1,2 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. В экспериментах по исследованию влияния энергии, а, значит, и мощности пучка, на величину ионной температуры было обнаружено насыщение роста ионной температуры $T_i(0)$ с ростом мощности. Обнаруженный эффект в поведении ионной температуры плазмы потребовал более детального изучения зависимости эффективности захвата и удержания быстрых ионов пучка в плазме от основных параметров плазмы и пучка. Результаты исследования нагрева ионной компоненты плазмы при нейтральной инжекции анализировались и представлены в диссертации Мельника А.Д. [7].

В параграфе 3.2 приведены результаты численного исследования удержания быстрых ионов при инжекции пучка в плазму компактного токамака, выполненного с целью оптимизации условий экспериментов. Осуществление инжекции в условиях компактного токамака сопряжено с рядом трудностей. Из-за малости размера токамака потери быстрых частиц, пролетевших сквозь плазму без ионизации, могут оказаться большими, особенно при значительных энергиях (>25 кэВ) пучка и малой плотности плазмы ($< 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$).

Моделирование зависимости эффективности захвата быстрых ионов пучка от параметров инжекции и разряда осуществлялось с помощью численного кода, описывающего траектории быстрых ионов в заданной магнитной конфигурации, рассчитывающего зоны захвата быстрых частиц и долю мощности пучка, поглощенной в плазме. На основании полученных расчетных данных была проведена оптимизация параметров плазмы-мишени и магнитных полей для обеспечения наиболее эффективного захвата пучка в плазме [A3]. С помощью моделирования было показано, что при максимальных параметрах разряда ($I_p = 180$ кА, $B_t = 1$ Тл) можно обеспечить эффективный захват инжектируемого пучка с энергией вплоть до $E_b = 25$ кэВ. Была

определена минимальная плотность плазмы $(2 - 2,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, при которой потери мощности пучка на пролет становятся пренебрежимо малыми.

В разделе 3.2.2 приведены результаты измерения абсолютной величины нейтронного потока в зависимости от параметров разряда и, в частности, от плотности плазмы. На рис. 1 приведены результаты этих экспериментов. Рисунок взят из работы [А4]. Эксперимент, также как и моделирование, показал, что $n_e = (2 - 2,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ является минимальной плотностью, при которой инжектируемый пучок частиц с энергией 23 кэВ почти полностью ионизируется в плазме и захватывается магнитным полем.

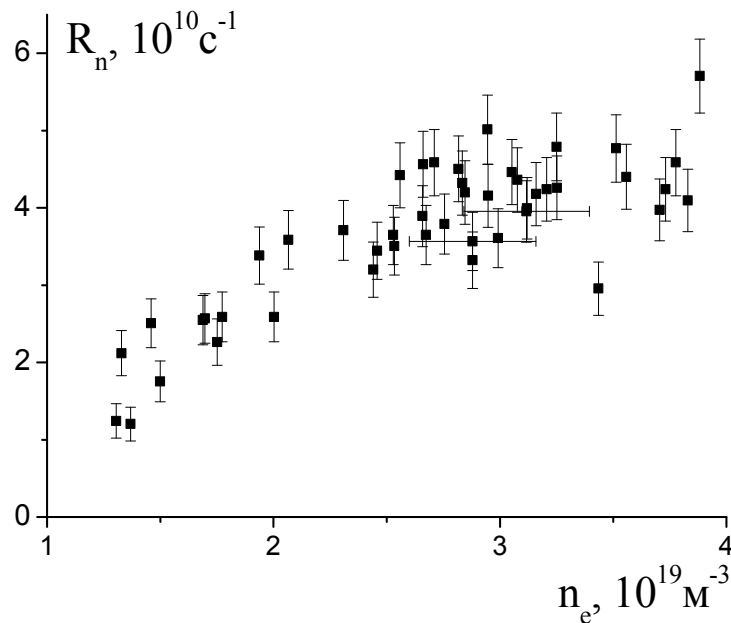


Рис.1. Зависимость нейтронного выхода R_n от плотности плазмы n_e . $B_t = 0,7 \text{ Тл}$, $I_p = (140-160) \text{ кА}$, $E_b = (17-19) \text{ кэВ}$ [А5]

Определение минимального значения плотности плазмы, при которой пучок инжектируемых частиц с заданной энергией полностью ионизируется, является необходимым условием для достижения максимальной эффективности использования компактного токамака, оборудованного нейтральной инжекцией в качестве источника термоядерных нейтронов.

В параграфе 3.3 приведены результаты измерения нейтронного выхода в зависимости от параметров разряда. Подробно изучено влияние «инженерных» параметров установки на нейтронные потоки [А5]. Результаты этих экспериментов представлены на рис.2. На рисунке видно, что при увеличении тороидального поля и тока плазмы с $B_t = 0,7 \text{ Тл}$, $I_p = 140 \text{ кА}$ до $B_t = 1 \text{ Тл}$, $I_p = 180 \text{ кА}$ интенсивность потока нейтронов увеличивается почти в 2 раза. Следует отметить, что увеличение B_t и I_p способствует росту электронной температуры из-за улучшения термоизоляции плазмы, что может приводить к дополнительному по отношению к обусловленному увеличением зон захвата увеличению R_n .

Далее в параграфе приведены измерения зависимости R_n от энергии быстрых ионов при различных значениях тока плазмы и магнитного поля. Превышение R_n при $B_t = 1$ Тл и $I_p = 180$ кА над R_n при $B_t = 0,7$ Тл и $I_p = 140$ кА объясняется увеличением зоны захвата быстрых частиц, другими словами увеличением количества захваченных быстрых частиц.

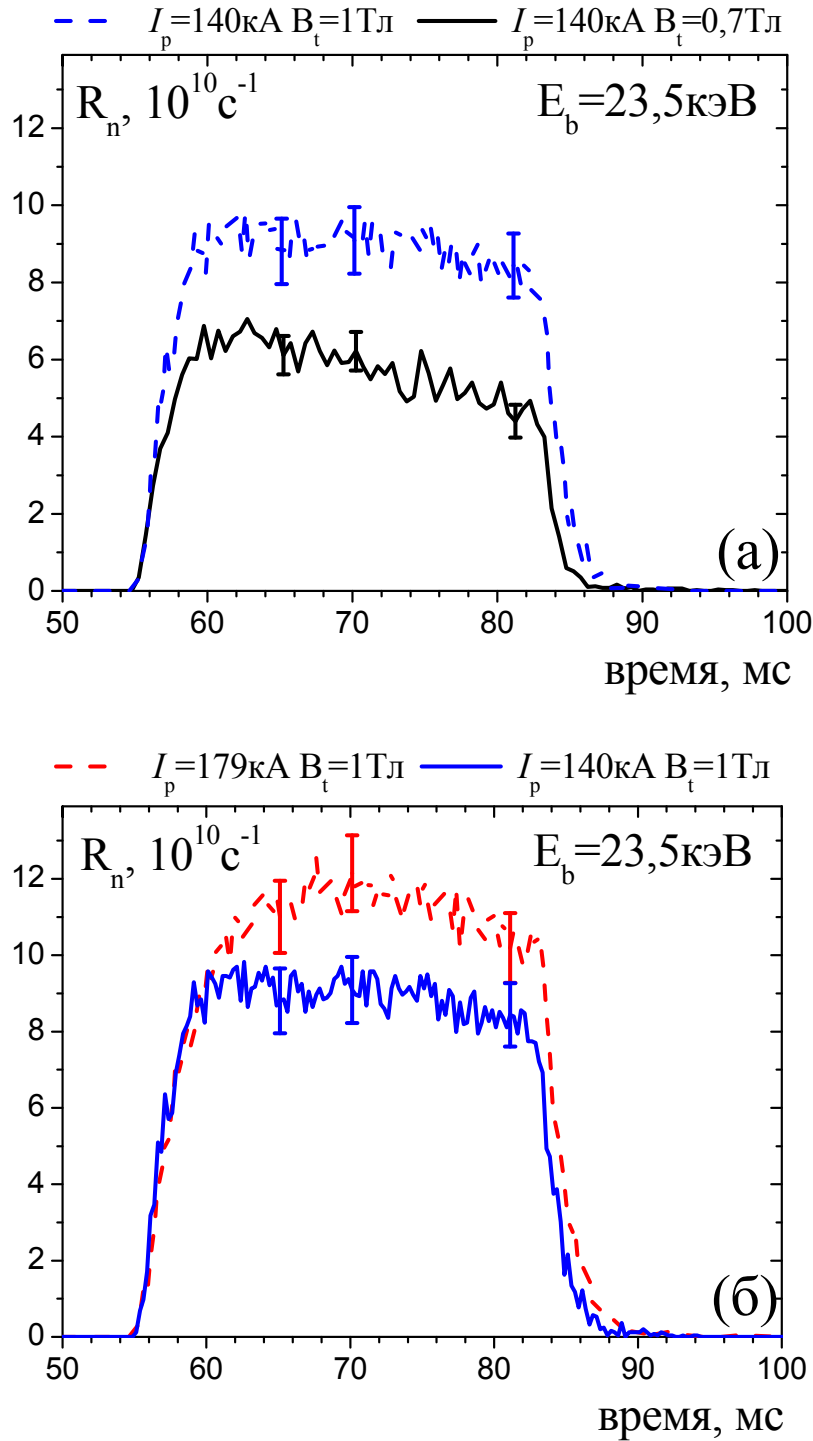


Рис.2. Временная эволюция выхода нейтронов в разрядах с инъекцией пучка для двух значений тороидального магнитного поля B_t (а) и тока плазмы I_p (б).

В разделе 3.3.2 представлены результаты исследования зависимости времени термализации быстрых ионов от плотности фоновой плазмы. Оценка времени термализации осуществлялась с помощью измерения времени спада нейтронного потока после выключения инжекции. Результаты этих экспериментов с использованием дейтериевого пучка, мощность которого не превышала 350 кВт, представлены на **рис.3** и в работе [A6].

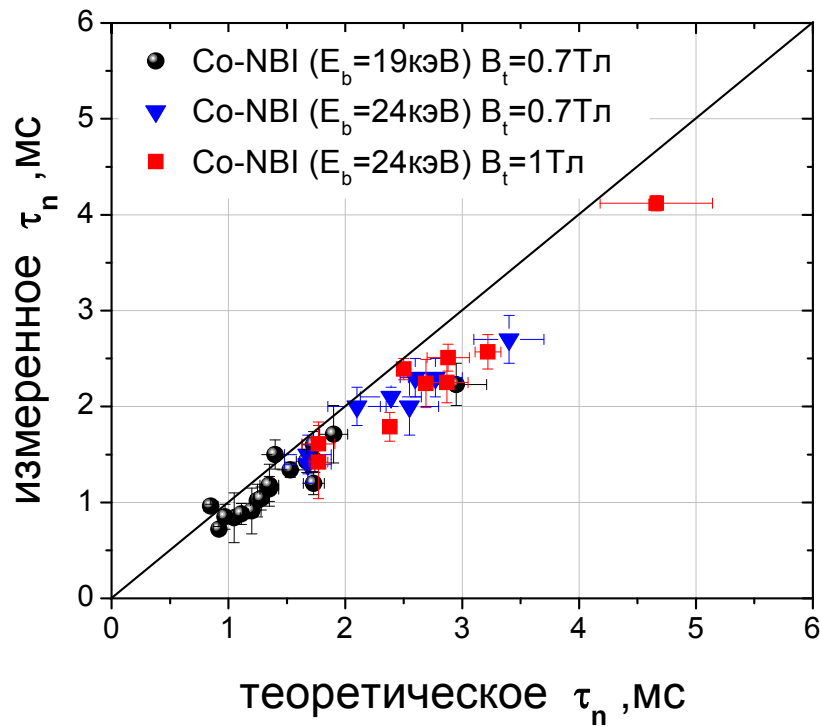


Рис.3 Сопоставление измеренного и рассчитанного в предположении справедливости кулоновского механизма торможения времен спада интенсивности нейтронов после выключения инжекции быстрых атомов.

В данной серии экспериментов длительность инжекции пучка была выбрана в пределах 5 - 7 мс. Измеренное время спада сравнивалось со временем термализации τ_n , вычисленным по формуле:

$$\tau_n = \frac{\tau_{se}}{3} \cdot \ln \left(\frac{E_b^{3/2} + E_c^{3/2}}{E_n^{3/2} + E_c^{3/2}} \right), \quad (1)$$

которое получено в соответствии с классической теорией кулоновских столкновений [4]. Хорошее совпадение измеренного времени спада нейтронного потока с теоретическими предсказаниями указывает на отсутствие аномальных источников потерь быстрых ионов в экспериментах на токамаке ТУМАН-3М.

Далее, в разделе 3.3.3 описаны исследования влияния смещения плазменного шнура по большому радиусу на величину нейтронного выхода [A7, A8]. Обнаружено, что смещение плазмы внутрь на 1 см приводит к 20%-ному увеличению нейтронного потока. Увеличение нейтронного потока происходит благодаря улучшению условий

захвата быстрых частиц инжектируемого пучка, ослаблению торможения на электронах (из-за роста электронной температуры) и снижению содержания примесей.

Исследование влияния смещения плазмы по большому радиусу на поток нейтронов было осуществлено и на сферическом токамаке Глобус-М [A9]. Обнаружено, что интенсивность нейтронного излучения растет при смещении плазмы внутрь вплоть до $\Delta R = 6$ см. Далее наступает насыщение роста нейтронного потока. Этот результат подтверждает объективную природу наблюдаемого явления.

В разделе 3.3.4 приведены результаты измерения нейтронных потоков во время внутренних срывов и МГД-возмущений на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М. На ТУМАНе-3М была обнаружена корреляция между внутренними срывами в центральной области плазмы, высокочастотными МГД-возмущениями, вспышками сигналов анализатора потока атомов перезарядки и некоторым спадом интенсивности потоков нейтронов. По относительному спаду интенсивности нейтронного потока R_n произведена оценка величины потерь быстрых частиц во время вспышки высокочастотного МГД возмущения и внутреннего срыва. Общий относительный спад R_n составил меньше 16%, что указывает на факт отсутствия значимого влияния этих явлений на удержание быстрых ионов.

Эксперименты на сферическом токамаке Глобус-М, показали значительную, до 50%, модуляцию интенсивности нейтронного потока, коррелировавшую с пилообразными колебаниями сигнала мягкого рентгеновского излучения при смещении плазмы наружу вдоль большого радиуса [A10]. При смещении плазменного разряда внутрь обнаружено уменьшение амплитуды модуляции нейтронного выхода, обусловленное, по-видимому, подавлением пилообразных колебаний за счет увеличения в такой геометрии коэффициента запаса устойчивости в центре плазмы.

В четвертой Главе представлены основные результаты по моделированию интенсивности нейтронного потока с помощью кода ASTRA [8] и построению эмпирической зависимости (скейлинга) интегрального нейтронного выхода от основных параметров плазмы и инжектируемого пучка.

В параграфе 4.1 описана методика построения скейлинга степенной зависимости R_n от плотности плазмы n_e , тороидального магнитного поля B_t , плазменного тока I_p , энергии инжектируемого пучка E_b и мощности инжекции P_b на основании собранной базы экспериментальных данных. Следует отметить, что при использовании одного из двух имеющихся в нашем распоряжении ионных источников построение скейлинга с независимыми энергией пучка E_b и мощностью инжекции P_b было бы невозможным, поскольку в таком случае эти величины не являются независимыми (ввиду связи между E_b и P_b , определяемой вольтамперной характеристикой каждого источника) [A11]. Использование источников ИПМ-2 и ИПМ-1, имеющих разные В/А характеристики, позволило «развязать» E_b и P_b [A12, A13]. В результате была получена следующая зависимость нейтронного потока от параметров эксперимента:

$$R_n = 6.4 \cdot 10^5 \cdot n_e^{0.37 \pm 0.14} \cdot B_t^{1.33 \pm 0.33} \cdot I_p^{1.42 \pm 0.50} \cdot E_b^{2.52 \pm 0.17} \cdot P_b^{1.0 \pm 0.1}, \quad [10^{19} \text{ м}^{-3}, \text{Тл}, \text{МА}, \text{кэВ}, \text{кВт}] \quad (2)$$

На **рис. 4** представлено сравнение экспериментальных значений нейтронного выхода со скейлингом. Полученный скейлинг позволил спрогнозировать уровень нейтронного выхода при других значениях плазмы и инжекции. Планируемая модернизация системы питания соленоида токамака ТУМАН-3М и инжектора позволит в будущем поднять величину B_t до 1,2 Тл, а энергию быстрых частиц E_b пучка до 25 кэВ. При максимальных значениях $B_t = 1,2$ Тл ($I_p = 216$ кА для $q_{cyl} = 2,5$), $E_b = 25$ кэВ и плотности плазмы $n_e = 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ полученный скейлинг прогнозирует рост интенсивности нейтронов от 10^{11} с^{-1} до $5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

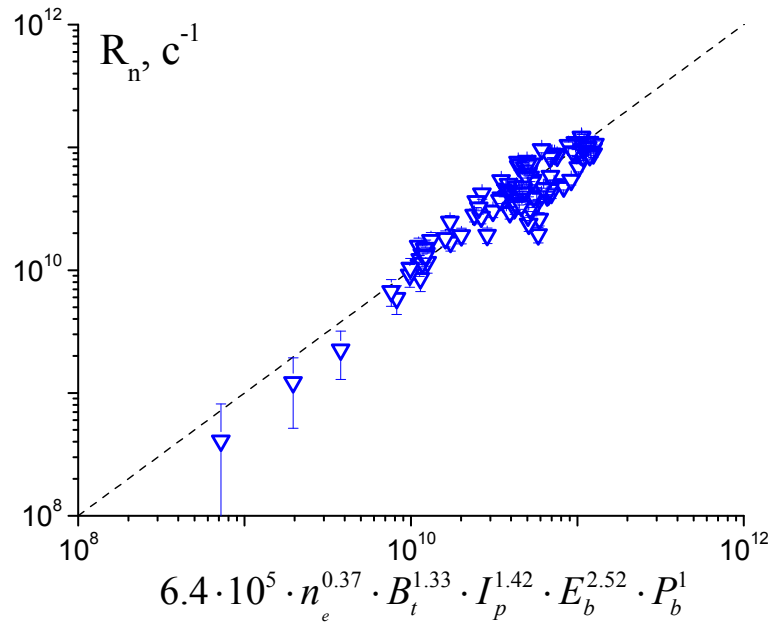


Рис. 4. Сравнение экспериментального выхода нейтронов R_n со скейлингом (2).

В **параграфе 4.2** представлены результаты численного моделирования с помощью транспортного кода АСТРА [8] нейтронного выхода и их сравнение с экспериментами. При температуре ионов фоновой плазмы $T_i < 350$ эВ основным источником нейтронов в экспериментах с нейтральной инжекцией в токамаке ТУМАН-3М является реакция слияния быстрых ионов дейтерия D_f и ионов плазмы D . В таких условиях измеряемый нейтронный поток R_n пропорционален плотности быстрых ионов n_{fi} и плотности ионов плазмы n_i . Таким образом, моделируя значения n_{fi} и n_i , в различных режимах плазмы и инжекции можно исследовать влияние B_t , I_p и E_b на величину нейтронного потока R_n . Моделирование величины n_{fi} в различных режимах работы показал значительный рост плотности быстрых ионов с энергией пучка E_b . Соответственно вырос и расчетный интегральный выход нейтронов. Экспериментальный выход нейтронов R_n хорошо коррелируют с расчетным вплоть до $E_b = 21$ кэВ. При более высоких энергиях рост потока нейтронов насыщался, тогда как расчетная величина R_n продолжала расти. Такое различие в поведении R_n связано либо с уменьшением плотности мишенной плазмы в результате роста эффективного заряда, либо с появлением дополнительного канала потерь быстрых частиц пучка, например, при транспортировке пучка от инжектора до плазмы.

Следует отметить, что численное моделирование также не показало насыщения R_n с ростом энергии, что, очевидно, может быть объяснено отсутствием в расчетах как эффекта разбавления мишенной плазмы за счет увеличения эффективного заряда, так и дополнительных потерь пучка в транспортировочном тракте.

Согласно вышеприведенному скейлингу (2), величина нейтронного потока R_n пропорциональна произведению $B_t^{1,33} \cdot I_p^{1,42}$. Сравнение указанной зависимости с экспериментом и результатами численного моделирования продемонстрировало хорошее согласие этих данных в широком диапазоне B_t и I_p вплоть до энергии 21 кэВ, что указывает на адекватность выбранных моделей мишенной плазмы и инжектируемого пучка и, следовательно, на возможность использования этих моделей в дальнейших расчетах.

В заключении изложены основные выводы и результаты работы:

1. На токамаке ТУМАН-3М создан инжекционный комплекс для исследования нагрева плазмы и генерации нейтронов. Модернизация комплекса позволила получить разряды ионного источника и системы в целом длительностью до 60 мс. Стендовые испытания инжекционного комплекса показали приемлемый уровень вертикальной и горизонтальной фокусировки, работоспособность комплекса вплоть до напряжений ускоряющего электрода 28 кВ. Достигнута оптимальная энергия нейтрального пучка $E_b = 23,5$ кэВ, при которой мощность, вводимая в плазму, составляла $P_b = 380$ кВт. Компьютеризированная система 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. Разработана нейтронная диагностика, использующая два детектора для регистрации 2,45 МэВ нейтронов на основе ^3He -газоразрядных счетчиков. Сигналы счетчиков регистрируются с помощью высокочастотных АЦП, позволяющих измерять нейтронные потоки со скоростью счета не ниже $10^5 - 10^6 \text{ с}^{-1}$. Данный тип детекторов позволяет регистрировать нейтроны с энергией от 1 до 10 МэВ. Диагностика прокалибрована для измерения интегрального нейтронного выхода R_n .
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 было исследовано влияние различных параметров инжектируемого пучка и мишенной плазмы на захват быстрых частиц и их термализацию. Время термализации быстрых ионов, оцененное по измерениям времени спада нейтронного потока после выключения инжекции, оказалось близким времени термализации, вычисленному в предположении справедливости классической теории кулоновских столкновений.
5. Экспериментально определена минимальная плотность плазмы, при которой пучок инжектируемых частиц с заданной энергией полностью ионизируется. Для условий ТУМАНа-3М эта плотность составляет $(2 - 2,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

6. Обнаружен быстрый рост нейтронного выхода R_n при увеличении энергии инжекции E_b в диапазоне 14-21 кэВ. Причем при $B_t = 1$ Тл и $I_p = 180$ 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.
7. При смещении плазменного разряда внутрь вдоль большого радиуса на $\Delta R = 1$ см обнаружены 20% рост нейтронного выхода и двукратный рост потока высокоэнергичных атомов перезарядки, обусловленные увеличенной зоной захвата быстрых ионов.
8. В разрядах с инжекцией пучка по току плазмы при высокой плотности наблюдаются высокочастотные МГД вспышки, типа “*sawbone*”. Нейтронные измерения показали, что заметного влияния на удержание быстрых ионов возмущения “*sawbone*” не оказывают.
9. 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 пины” быстрыми ионами.
10. 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.

Список основных публикаций автора по теме диссертации:

- A1. *L.G. Askinazi, A.G. Barsukov, F.V. Chernyshev, ..., V.A. Kornev, et al.* First experiments on NBI in the TUMAN-3M tokamak: Proc. of 32th EPS Conf. on Plasma Phys., Tarragona - 2005. - V.29C - P-1.102.
- A2. *L.G. Askinazi, F.V. Chernyshev, V.E. Golant, ..., V.A. Kornev, et al.* Confinement of NBI-originated fast ions in TUMAN-3M: Proc. of 34th EPS Conf. on Plasma Phys. - Warsaw, 2007. - V.31F - P-1.146.
- A3. *Л.Г. Аскинази, М.И. Вильджюнас, В.А. Корнев, и др.* Радиальный ток в токамаке при инжекции нейтрального пучка // Письма ЖТФ – 2013. - Т.39 - вып.4 - С.73.
- A4. *V.A. Kornev, L.G. Askinazi, F.V. Chernyshev, et al.* Analysis of Density Dependence of Neutron Rate in NBI Experiments on TUMAN-3M: Proc. of 35th EPS Conf. on Plasma Phys. – Hersonissos – 2008. - V.32D - P-2.103.
- A5. *V.A. Kornev, L.G. Askinazi, F.V. Chernyshev, et al.* Study of fast ion confinement using 2.45 MeV D-D emission in TUMAN-3M: Proc. of 37th EPS Conf. on Plasma Phys. – Dublin – 2010. - V.34A - P-5.160.
- A6. *В.А. Корнев, Л.Г. Аскинази, М.И. Вильджюнас и др.* Удержание энергичных ионов в плазме токамака при магнитном поле 0.7–1.0 Тл // Письма ЖТФ. – 2013. - Т.39 - вып. 6 - С.41.
- A7. *М.И. Вильджюнас, В.А. Корнев, Л.Г. Аскинази и др.* Оптимизация геометрии ввода нагревного нейтрального пучка в токамак ТУМАН-3М // Письма ЖТФ – 2013. - Т.39 - вып.22 - С.80.
- A8. *В.А. Корнев, Ф.В. Чернышев, А.Д. Мельник и др.* Влияние смещения плазмы по большому радиусу на потоки нейтронов и нейтральных атомов при инжекционном нагреве на токамаке ТУМАН-3М // Письма ЖТФ – 2013. - Т.39 - вып.22 - С.64.
- A9. *V.K. Gusev, E.A. Azizov, A.B. Alekseev, ..., V.A. Kornev, et al.* Globus-M results as the basis for a compact spherical tokamak with enhanced parameters Globus-M2 // Nucl. Fusion 53 (2013) 093013.
- A10. *N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, P.R. Goncharov, ..., V.A. Kornev, et al.* Fast particle behaviour in the Globus-M spherical tokamak // Nucl. Fusion 55 (2015) 043023.
- A11. *L.G. Askinazi, V.I. Afanasyev, A.B. Altukhov, ..., V.A. Kornev, et al.* Fusion Research in Ioffe Institute // Nucl. Fusion **55** (2015) 104013 (14pp).
- A12. *V.A. Kornev, L.G. Askinazi, A.A. Belokurov, et al.* Study of neutron generation in the compact tokamak TUMAN-3M in support of a tokamak-based fusion neutron source // Nucl. Fusion **57** (2017) 126005 (6pp).
- A13. *V.A. Kornev, L.G. Askinazi, A.A. Belokurov, et al.* Plasma heating and neutron production in the TUMAN-3M: Proc. of 45th EPS Conf. on Plasma Phys. – Prague – 2018. - V.42A - P-4.1070.

Список цитируемой литературы:

1. *Artsimovich L.A., Bobrovsky G., Gorbunov E.P., et al.* // Plasma Phys. Controlled Nucl. Fusion Res., Int. Conf., 3rd Novosibirsk. - 1968. – № 1 - P. 157.
2. *Peng Y.-K.M., Cheng E.T.* Magnetic fusion driven transmutation and power production in fusion reactor // Fusion Technol. - 1996. - V.30 - P.1654.

3. Воробьев Г.М., Голант В.Е., Горностаев С.В. и др. Эксперименты по омическому нагреву и сжатию плазмы на токамаке ТУМАН-3М // Физика Плазмы - 1983. – т. 9 - вып. 1 - С 105.
4. Сивухин Д.В. Вопросы теории плазмы – 1963. – № 1 - Атомиздат - М. - 98с.
5. Аскинази Л.Г., Барсуков А.Г., Голант В.Е. и др. Препринт - 1763. ФТИ им А.Ф. Иоффе - 2003. - С. 29.
6. Панасенков А.А., Равичев С.А., Рогов А.В. Источник ионов водорода с периферийным магнитным полем. // Вопросы атомной науки и техники - серия Термоядерный синтез - 1984. - т. 15 - № 2 - 56-63с.
7. Мельник А.Д. Исследование ионного компонента плазмы в токамаках при нейтральной инжекции методом корпускулярной диагностики: диссертация канд. физ.-мат. наук: 01.04.08. – СПб., 2017. – 168с.
8. Pereverzev G., Yushmanov P.N. ASTRA Automated System for Transport Analysis in a Tokamak. // Preprint IPP 5/98 - 2002.