

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Немцев Григорий Евгеньевич

**РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИКИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ
ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ПРОФИЛЯ
ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В
ТОКАМАКЕ**

Специальность 1.3.9 —
«Физика плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва — 2024

Работа выполнена в Частном учреждении Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР».

Научный руководитель: **Красильников Анатолий Витальевич,**
доктор физико-математических наук,
Частное учреждение «ИТЭР-Центр»,
директор

Официальные оппоненты: **Багрянский Петр Андреевич,**
доктор физико-математических наук,
Институт ядерной физики имени Г. И.
Будкера СО РАН, заместитель директора
по научной работе, заведующий лабораторией 9-1

Саврухин Пётр Всеволодович,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение "Национальный исследова-
тельский центр "Курчатовский инсти-
тут", ведущий научный сотрудник


Шевелев Александр Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук, и.о. старшего научного со-
трудника

Защита состоится 10 апреля 2024 г. в 17:00 на заседании диссертационного совета МИФИ.1.01 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ds.mephi.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
МИФИ.1.01,
к.ф.-м.н.



Степаненко А.А.

Общая характеристика работы

Измерение нейтронов, образующихся при термоядерном синтезе, является одной из наиболее важных диагностических задач высокотемпературной плазмы. Нейтронная диагностика играет ключевую роль в токамаке ИТЭР. Благодаря нейтронной диагностике получают информацию о скорости протекания термоядерной реакции, эффективности нагрева плазмы, как с помощью вспомогательных систем ионного и электронного циклотронного резонансного нагрева, инжекторов нейтральных частиц, так и нагрева с помощью рожденных в плазме альфа-частиц. Знание полного выхода нейтронов и нейтронного флюенса критично для оценки уровня активации конструкций и проектирования защиты персонала от ионизирующего излучения. По измерениям спектра нейтронов можно определять как температуру ионов, так и эффективность их термализации. Компоненты строящихся и проектируемых установок для термоядерной энергетики будут работать в условиях больших радиационных нагрузок и в условиях большого флюенса нейтронов. Это накладывает ограничение как на перечень применяемых материалов, так и на возможность реализации множества диагностик плазмы. Поэтому измерение нейтронного выхода с высоким временным разрешением становится все более и более критичным для термоядерных установок.

На современных больших токамаках, таких как JET, как правило, реализован целый комплекс нейтронных диагностик: мониторы нейтронного выхода, нейтронно-активационная система, полупроводниковые, времяпролетные или сцинтилляционные нейтронные спектрометры [1]. Подобные системы разрабатываются и для строящегося в настоящий момент токамака ИТЭР [2]. Но наиболее полную информацию о плазменном нейтронном источнике могут дать системы, построенные на основе многоканальных нейтронных коллиматоров. Целью нейтронного многоканального коллиматора является измерение пространственного распределения нейтронного источника с временным разрешением в поперечном сечении плазмы токамака. Это может дать информацию об общем выходе нейтронов, профиле плотности мощности термоядерного синтеза, пространственном распределении интенсивности нейтронного источника. Знание этих профилей необходимо для оценки энергетического удержания частиц, баланса энергии ионов и переноса частиц. Более того, при наличии мощного дополнительного нагрева плазмы (ион-циклотронный резонансный нагрев или инжекция нейтральных пучков), измерение профиля нейтронного источника полезно при определении функции распределения быстрых ионов в плазме. Когда плазма имеет максвелловское или почти максвелловское распределение ионов, из дополнительного измерения нейтронного спектра можно получить профиль ионной температуры. Особенностью взаимодействия быстрых нейтронов с веществом является большая длина свободного

пробега. Поэтому нейтронные коллиматоры в общем случае представляют собой протяженные (свыше 1 м) и тяжелые конструкции (свыше 10 т), что накладывает ограничения на их интеграцию в термоядерную установку. Подобные диагностические системы были созданы для токамаков JT-60 [3], TFTR [4] и JET [5]. В настоящий момент для токамака ИТЭР разрабатываются вертикальная (ВНК) и радиальная (РНК) нейтронные камеры [6]. В данной работе приведены результаты разработки диагностики ВНК. Согласно обязательствам Российской Федерации в международном проекте ИТЭР диагностическая система ВНК должна быть изготовлена и поставлена в соответствии с требованиями проекта.

В настоящий момент также ведется разработка токамака с реакторными технологиями (TRT). TRT представляет собой квазистационарную термоядерную плазменную установку с длительностью разряда более 100 с. Для нагрева плазмы на токамаке планируется использовать целый ряд систем дополнительного нагрева, включая инжекторы атомов с энергией 0.5 МэВ на базе источников отрицательных ионов, мегаваттные гиротроны с частотой излучения 230–260 ГГц, систему ионного циклотронного нагрева мощностью до 5 МВт в частотном диапазоне 60–80 МГц. Суммарная мощность дополнительного нагрева установки — до 40 МВт [7]. При этом максимальная плотность частиц в установке будет достигать $2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Дополнительно, на установке планируется реализовать комплекс напуска трития. При данных параметрах стоит ожидать значительного нейтронного выхода. В целом, прогнозируется, что полный нейтронный поток будет достигать 5×10^{17} нейтронов/с для DD плазмы и свыше 10^{18} нейтронов/с для DT плазмы. Ввиду столь значительного выхода нейтронов и большого объема плазмы возникает необходимость пространственного разрешения нейтронного источника. В данной работе предлагается проект диагностической системы для измерения распределения пространственной интенсивности нейтронного источника, что позволит исследовать эволюцию ионного компонента плазмы.

Отличительной особенностью как токамака ИТЭР, так и токамака TRT является использование сверхпроводников в магнитной системе (сверхпроводящие магнитные катушки неизбежно будут использоваться и в будущих термоядерных установках с магнитным удержанием). Вакуумная камера подобных установок находится в глубине объема криостата. Поэтому патрубки, предназначенные для размещения диагностических систем, являются довольно протяженными конструкциями. Если разместить многоканальные нейтронные коллиматоры за пределами криостата, то линии наблюдения смогут охватывать только центральную область плазмы, что не позволит получить полное пространственное распределение интенсивности нейтронного источника. Поэтому возникает необходимость передвигать коллиматоры и детекторы ближе к плазменному источнику. В

проекте токамака ИТЭР отсутствуют вертикальные порты [8]. Единственным доступным местом для размещения вертикальных линий наблюдения являются радиальные порты: верхний и нижний. При таком размещении нейтронные детекторы и коллиматоры должны неизбежно заходить вглубь криостата токамака. В данной области нейтронные детекторы будут вынуждены работать в условиях высокоинтенсивных потоков ионизирующего излучения, воздействия потоков быстрых частиц из плазмы, в присутствии сильного магнитного поля [9]. Вследствие этого подобная диагностическая система и детекторы будут подвергаться сильным статическим и динамическим механическим нагрузкам, значительному радиационному нагреву, в измерительных каналах будет высокая рабочая температура. Другой проблемой является необходимость размещения нейтронных детекторов в условиях высокого вакуума установки (давление внутри вакуумной камеры менее 10^{-4} Па), что для подобных систем делается впервые. Это накладывает серьезные ограничения на выбор материалов конструкции и значительно усложняет интеграцию и обслуживание системы. Поэтому одной из задач данной работы было создание нейтронных детекторов, способных выдержать условия эксплуатации ВНК. Еще одной сложностью подобного размещения является ограниченное пространство для размещения достаточного количества нейтронной защиты. Проведенный расчет переноса нейтронного излучения показал присутствие значительного количества фоновых нейтронов в месте размещения детекторов диагностики [А3]. Другой проблемой является размещение компонентов коллиматоров в нижнем порту в трех совершенно независимых друг от друга компонентах: модуле бланкета, диверторной кассете и диагностическом рэке. Поэтому естественно необходимо, чтобы компоненты коллиматоров, находящиеся в разных конструкциях, были выравнены относительно друг друга. Решение данных проблем приведено в работе. Одной из задач, стоящих перед токамаком ИТЭР является измерение нейтронного выхода с 1 мс временным разрешением. Это привело к повышенным требованиям к детекторам и системе регистрации. Кроме того, в зависимости от режимов работы токамака и концентрации ионов дейтерия и трития нейтронный выход может меняться на несколько порядков. Это зачастую требует использования нескольких детекторов с различной чувствительностью. В Вертикальной нейтронной камере ИТЭР в качестве детекторов нейтронного излучения предполагается использовать детекторы на основе CVD алмазных пластин. В рамках создания диагностики ВНК была выполнена разработка алмазных детекторов высокого спектрометрического разрешения. Поэтому одной из задач работы было испытание алмазных детекторов в условиях действующей термоядерной установки. Наиболее подходящим местом является токамак JET, на котором в настоящий момент достигнут наибольший выход термоядерных нейтронов [10]. В 2011 году на JET была установлена бериллиевая первая стенка с вольфрамовым дивертором, так

называемая «ITER-like wall» [11]. В период с 2012 года по 2020 токамак работал, в том числе, с DD плазмой и общий выход нейтронов с энергией 2,5 МэВ за разряд достигал 10^{16} [12]. На период кампании на установке JET был установлен монитор выхода нейтронов на основе алмазного детектора с временным и энергетическим разрешением [A2]. Результаты измерений выхода нейтронов приведены в данной работе.

Актуальность данной работы. В настоящее время ведется строительство международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Одной из диагностических систем данного токамака является Вертикальная нейтронная камера (ВНК) - система, предназначенная для измерения пространственного распределения интенсивности нейтронного источника. Другим проектируемым в России в настоящий момент токамаком является токамак с реакторными технологиями TRT. Значительный выход нейтронов и большой объем плазмы на данной установке требуют создание диагностической системы для измерения пространственного распределения интенсивности плазменного нейтронного источника. В общем случае различные переходные процессы, происходящие в плазме токамака, такие как включение-выключение дополнительного нагрева, пилообразные колебания, развитие неустойчивостей, так или иначе оказывают влияние на выход нейтронов и их энергетическое распределение. Данная работа посвящена разработке диагностических систем методом анализа профиля источника термоядерных нейтронов для исследования переходных процессов в плазме токамаков ИТЭР и TRT.

Основные **цели** данной работы:

1. Создание диагностической системы Вертикальная нейтронная камера, предназначенной для измерения профиля источника термоядерных нейтронов с временным разрешением 1 мс, что обеспечит исследование переходных процессов в плазме токамака ИТЭР.
2. Разработка методики пространственного распределения интенсивности источника термоядерных нейтронов для токамака с реакторными технологиями TRT, что позволит исследовать эволюцию ионного компонента плазмы.

Для достижения поставленных целей было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать коллиматоры ВНК, обеспечивающие максимальное отношение сигнал/фон в месте расположения детекторов (соотношение между прямыми нейтронами плазменного источника и нейтронами рассеянными на конструкции), и детекторные модули, обеспечивающих позиционирование детекторных узлов и способных выдержать условия эксплуатации внутри вакуумных портов токамака ИТЭР.

2. Создать детекторный узел и линии связи, способные работать в условиях ВНК ИТЭР: высокая температура, высокий вакуум, высокие потоки ионизирующего излучения, сильные статические и динамические механические нагрузки. Исследовать влияние условий эксплуатации на чувствительность к быстрым нейтронам и энергетическое разрешение детекторов ВНК.
3. Создать систему сбора данных диагностики, обеспечивающую минимальную потерю информации о первоначальном сигнале детектора и позволяющую измерять нейтронные потоки на детекторах с временным разрешением в 1 мс в широком динамическом диапазоне измерений.
4. Провести измерения интенсивности нейтронного излучения плазмы на действующем токамаке в процессе развития плазменного разряда. Исследовать переходные процессы, происходящие в плазме токамака, влияющие на полный поток нейтронов и нейтронный спектр.
5. Разработать проект диагностической системы для измерения пространственного распределения интенсивности плазменного нейтронного источника TRT, включая коллиматоры, нейтронную защиты и детекторы.
6. Провести моделирование переноса нейтронного излучения плазмы в токамаке TRT, определить потоки и спектры нейтронов в местах размещения нейтронных детекторов диагностической системы «Многоканальный нейтронный коллиматор». Определить диапазоны измеряемых параметров плазмы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана диагностика, предназначенная для измерения профиля нейтронного источника плазмы токамака ИТЭР. Предложены решения, позволяющие увеличить отношение сигнал/фон диагностической системы с уровня 0,5 до 5. Созданная система сбора данных диагностики реализует измерение плотности потока нейтронов в реальном времени с временным разрешением 1 мс в динамическом диапазоне термоядерной мощности ИТЭР от 0,1 до 900 МВт.
2. Экспериментально исследован отклик нейтронной диагностики ВНК при работе в условиях токамака-реактора ИТЭР. Измерены параметры нейтронных детекторов ВНК (чувствительность, энергетическое разрешение) при повышенной температуре до 250°C, плотности потока термоядерных нейтронов до 10^9 н/см²с и флюенсе до 10^{14} н/см².
3. Создана диагностическая система токамака JET на основе алмазного детектора, позволяющая измерять динамику выхода нейтронов в режимах с нейтральной инжекцией. Реализована методика

одновременного определения выхода DD и DT нейтронов в разрядах токамака. С помощью диагностики исследована динамика возникновения тока убегающих электронов по измерениям жесткого рентгеновского излучения.

4. Исследован процесс удержания и термализации трития, рожденного в DD-реакции. Показано, что в разрядах с высокими значениями тока плазмы ($>2,5$ MA) выход DT нейтронов зависит от времени электрон-ионных столкновений. Время торможения термоядерных ионов трития в разрядах JET, измеренное экспериментально, соответствует классической теории торможения ионов.
5. Предложен метод измерения пространственного распределения удельной интенсивности нейтронного источника плазмы токамака с реакторными технологиями TRT в диапазоне $10^8 - 10^{12} \text{ н}/(\text{см}^3 \text{ с})$ с временным разрешением 1 мс и пространственным разрешением 12 см.

Научная новизна:

1. Разработана диагностическая система для измерения профиля нейтронного источника, с размещением нейтронных детекторов внутри вакуумной камеры.
2. Экспериментально определено влияние воздействия длительных термоциклических нагрузок и влияние длинной линии связи, включающей кабель с минеральной изоляцией, на параметры сигнала алмазного детектора.
3. Разработана и испытана измерительная система, позволяющая обрабатывать в реальном времени сигналы нейтронного детектора со скоростью оцифровки 800 МВыв/с, что позволяет достичь 1 мс временного разрешения.
4. На действующей термоядерной установке показана возможность исследования динамики возникновения тока убегающих электронов по измерениям жесткого рентгеновского излучения алмазным детектором.
5. Предложен проект диагностики для измерения профиля нейтронного источника для токамака TRT. Определены динамические диапазоны измеряемых диагностикой плазменных параметров.

Практическая значимость данной работы заключается в следующем:

1. Конструкторские решения, предложенные в данной работе, планируется реализовать при изготовлении и поставке диагностической системы ВНК ИТЭР. Применение данных решений позволило значительно улучшить отношение сигнал/фон диагностики. Используемые при конструировании подходы могут быть применены к аналогичным системам измерения профиля нейтронного источника на других термоядерных установках.

2. Созданные для задачи диагностики ВНК блоки детектирования быстрых нейтронов и элементы системы сбора данных можно использовать на других ядерных установках, где требуется измерение динамики выхода нейтронов в условиях сильных механических нагрузок, высокой температуры, высокоинтенсивных полей нейтронного и гамма-излучения.
3. Измерения на токамаке JET, показали, что диагностическая система на основе алмазного детектора, кроме динамики выхода нейтронов может дать информацию об удержании быстрых частиц в плазме и развитии неустойчивостей, что может быть применено на других термоядерных установках.
4. Разработаны требования к измеряемым физическим параметрам и определены динамические диапазоны измерений для диагностики нейтронного профиля на проектируемом в настоящий момент токамаке TRT.

Достоверность полученных результатов обеспечивается успешным проведением многочисленных экспериментов с использованием различных источников ионизирующего излучения. Детекторы нейтронов, линии связи и система сбора и обработки данных испытывались в условиях эксплуатации, приближенных к условиям, ожидаемым на токамаке ИТЭР: высокая температура, высокая плотность потока нейтронов, длинные линии связи с использованием кабелей с минеральной изоляцией. На основе компонентов, разработанных для нейтронной камеры токамака ИТЭР на крупнейшем действующем токамаке JET была создана измерительная система, позволяющая измерять нейтронный выход токамака в различных режимах работы. Результаты измерений полного нейтронного потока согласуются с измерениями, выполненными другими диагностическими системами установки JET.

Апробация работы. Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях:

- International Conference on Fusion Reactor Diagnostics (2013);
- EPS conference on Plasma Diagnostics (2015);
- Всероссийская конференция по диагностике высокотемпературной плазмы (2017, 2019, 2021);
- Международная звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (2019, 2020, 2021).
- The 7th International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (2021);

Полученные результаты представлялись и обсуждались на международных и российских совещаниях по диагностикам ИТЭР и TRT, а также на международном координационном комитете ИГРА (Международная программа, посвященная физике токамаков).

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 18 печатных работах, 8 из которых изданы в виде статей в российских и зарубежных журналах, включённых в перечень ВАК и/или индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 10 – в тезисах докладов.

Личный вклад. Автор внес определяющий вклад в разработку и интеграцию диагностической системы ВНК в токамак ИТЭР. Автором предложена оригинальная конструкция коллиматоров и детекторов ВНК, позволяющие значительно улучшить отношение сигнал/фон диагностики. Автором проведены испытания детекторов ВНК на различных источниках быстрых нейтронов в условиях, моделирующих условия ВНК, такие, как высокая температура и высокоинтенсивные радиационные поля. Автором выполнено макетирование и проведены испытания линии связи и системы сбора данных диагностики. Автор установил диагностическую систему по измерению нейтронного выхода на токамак JET, обработал и проанализировал данные измерений. На основании опыта, полученного при разработке ВНК ИТЭР автором предложен проект многоканального нейтронного коллиматора для перспективного токамака с реакторными технологиями TRT.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет **133** страницы текста с **67** рисунками и 11 таблицами. Список литературы содержит **81** наименование.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели работы, ставятся задачи необходимые для их выполнения, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена обзору методов диагностики быстрых нейтронов на токамаках.

В разделе 1.1 кратко описываются основные системы нейтронных диагностик, применяемые на токамаках [13]. Перечень и описание данных систем приведено в таблице 1.

В разделе 1.2 приведено описание основных термоядерных реакций в плазме с выходом нейтронов. Приведено сечение DD и DT реакций.

В разделе 1.3 приведены результаты работ по моделированию спектра нейтронов в зависимости от энергии ионов [14; 15]. Показано, что при низких температурах ионов можно связать ширину на полувысоте пика нейтронного спектра с ионной температурой в случае максвелловской функции распределения: $F = 82.6\sqrt{T_i}$ для DD нейтронов и $F = 177.2\sqrt{T_i}$ для DT нейтронов.

Таблица 1 — Системы измерения быстрых нейтронов на токамаках

Система	Применение
Монитор нейтронного потока	Измерение нейтронного выхода во времени.
Нейтронно-активационная система	Измерение полного нейтронного выхода в разряде. Калибровка мониторов нейтронного потока.
Многоканальный нейтронный коллиматор (нейтронная камера)	Томографическое восстановление профиля нейтронного источника. Измерение полного нейтронного потока.
Нейтронный спектрометр (радиальный или тангенциальный)	Измерение нейтронного спектра. Изучение термализации нагревного пучка. Разделение нейтронов от D-D и D-T плазменного источника.

Раздел 1.4 посвящен проблеме измерения нейтронов с временным разрешением. Переходные процессы, происходящие в плазме токамака оказывают влияние как на общий выход нейтронов, так и на их энергетическое распределение. Поэтому для современных установок, таких как ИТЭР и TRT, стоит задача измерения выхода нейтронов с временным разрешением в 1 мс.

В разделе 1.5 описываются основные детекторы, применяемые для регистрации термоядерных нейтронов, их преимущества и недостатки. Это ионизационные камеры деления, органические и неорганические сцинтилляторы, полупроводниковые детекторы, различные виды времяпролетных спектрометров.

В разделе 1.6 приводятся основные требования, предъявляемые к нейтронным диагностикам ИТЭР. Нейтронные диагностические системы должны измерять следующие плазменные параметры: полный нейтронный поток, полная термоядерная мощность плазмы, пространственное распределение интенсивности нейтронного источника, отношение концентраций ионов дейтерия и трития, профиль ионной температуры. Приведены диапазоны измерений, погрешности, пространственное и временное разрешение.

Разделы 1.7-1.9 посвящены описанию систем нейтронных диагностик на токамаке ИТЭР. Для токамака разрабатываются несколько мониторов нейтронного потока [16–18], нейтронные спектрометры [19; 20], многоканальные нейтронные коллиматоры [2; 6]. Последние системы дают наиболее полную информацию о плазменном нейтронном источнике. Целью многоканального нейтронного коллиматора является измерение пространственного распределения интенсивности нейтронного источника с временным разрешением в полоидальном сечении плазмы токамака. Подобные диагностические системы были созданы для токамаков JT-60 [3], TFTR [4] и JET [5].

Вторая глава посвящена разработке диагностики «Вертикальная Нейтронная камера». Приводится описание детекторов, каналов коллиматоров, коммуникаций, системы сбора данных. Показана оптимизация коллиматоров верхней ВНК, позволившая в несколько раз улучшить отношение сигнал-фон в измерительных каналах. Для нижней ВНК показано влияние смещения каналов коллиматоров на сигнал-фон детекторов.

В разделе 2.1 дано общее описание системы ВНК ИТЭР и приведены требования к измеряемым диагностикой плазменным параметрам. Вертикальная нейтронная камера - диагностика на основе многоканального нейтронного коллиматора, совместно с Радиальной нейтронной камерой предназначенная для измерения профиля нейтронного источника термоядерной плазмы в реальном времени. Общий вид диагностики показан на рисунке 1. В качестве нейтронных детекторов в ВНК используются детекторы на основе монокристаллического CVD алмаза и ионизационные камеры деления.

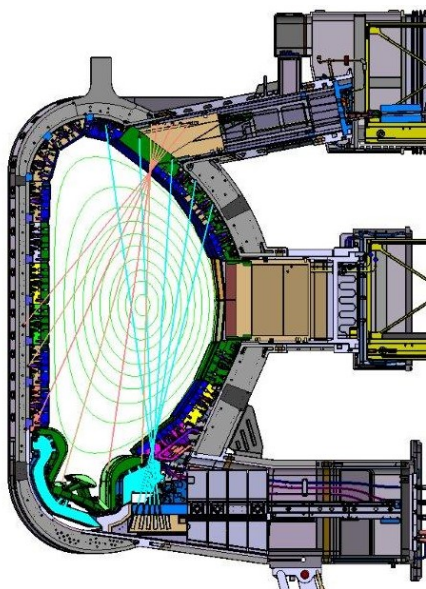


Рис. 1 — Общий вид диагностики ВНК и линии наблюдения

В разделах 2.2 и 2.3 описывается конструкция ВНК и ее интеграция в порты ИТЭР [A5]. Как видно из рисунка 1 ВНК состоит из двух подсистем, верхней, расположенной в верхнем порт-плаге 18 порта и нижней, расположенной в нижнем 14 порту (на рисунке обе диагностические подсистемы для наглядности показаны в одной плоскости). Обе подсистемы

расположены внутри вакуумной камер ИТЭР. Компонентами ВНК являются детекторные модули — сборки, обеспечивающие позиционирование детекторных узлов и защищающие их от повышенных нагрузок внутри токамака. Детекторный узел или блок детектирования быстрых нейтронов (БДБН) представляет собой сборку из двух ИКД и двух алмазных детекторов различной чувствительности, чтобы обеспечить широкий динамический диапазон измерений. Снаружи вакуумной камеры находится блок электроники предварительного усиления, помещенный в защитный шкаф, чтобы уменьшить воздействие ионизирующего излучения [A14]. В диагностическом здании находится система управления и сбора данных ВНК.

Раздел 2.4 посвящен работе по оптимизации линий наблюдения верхней ВНК. В первоначальной конструкции ВНК были цилиндрические коллиматоры, и из-за невозможности размещения достаточного количества нейтронной защиты на измерения ВНК оказывает существенное влияние фон рассеянных нейтронов [A3, A9]. Чтобы улучшить отношение сигнал-фон были предложены коллиматоры прямоугольной формы и оптимизация чувствительных элементов нейтронных детекторов [A6]. Также была предложена конструкция вырезов каналов коллиматоров в первой стенке и диагностическом защитном модуле порт-плага. В результате проведенной оптимизации был получен вариант конструкции, реализуемой с инженерной точки зрения, сохранив при этом отношение сигнал/фон максимально возможным [A17].

В разделе 2.5 рассматривается проблема относительного выравнивания коллиматоров нижней ВНК. Наиболее длинная часть коллиматорных каналов сделана в теле диверторной каскеты, длина отверстий достигает 1 м. Веерообразные лучи коллиматоров сходятся в теле бланкета, формируя фокусную точку. Поэтому там вместо отдельных отверстий имеется обширный общий вырез. Однако возникает другая проблема: бланкет, диверторная каскета и детекторный модуль будут устанавливаться совершенно независимо, крепясь к различным точкам внутри вакуумной камеры. Поэтому естественно необходимо, чтобы компоненты коллиматоров, находящиеся в разных конструкциях, были выровнены относительно друг друга. Возможные смещения и повороты бланкета, дивертора и река повлияют на прохождение прямых нейтронов, а следовательно, на качество реконструкции профиля нейтронов. В разделе приведен анализ влияния данных погрешностей на работу диагностики, предложены способ компенсации данных погрешностей [A18].

В разделе 2.6 рассматривается система сбора данных ВНК [A12]. Одним из ключевых требований, предъявляемых к диагностической системе, является измерение пространственного распределения интенсивности нейтронного источника с временным разрешением в 1 мс. Сигналы ВНК представляют собой слабые импульсы тока амплитудой до 10 мкА и

длительностью 1-100 нс [21; 22], поэтому их требуется предварительно усиливать для передачи, записи и обработки. Для передачи высокочастотного сигнала от блока детектирования к предусилителю внутри вакуумной камеры используется триаксиальный кабель с минеральной изоляцией.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию отклика диагностической системы ВНК ИТЭР. Окружающие условия внутри порт-плага и диагностического рэка довольно суровые: плотность потока быстрых нейтронов в зависимости от линии наблюдения и режима работы токамака меняется от 10^5 до 10^{11} n/cm^2s , рабочая температура составляет около $100^\circ C$ (до 250° во время технологического прогрева вакуумной камеры), магнитное поле достигает 1,5 Тл [23]. Приведены результаты испытаний детекторов. На экспериментальных стендах моделировались условия, схожие с условиями в измерительных каналах ВНК. Два алмазных детектора и две ионизационные камеры деления интегрированы в единое изделие, которое называется блок детектирования быстрых нейтронов (БДБН). Требования, предъявляемые к изготовлению БДБН изложены в разделе 3.1.

Раздел 3.2 посвящен описанию результатов испытаний ИКД на основе ^{238}U . Как уже было упомянуто для нужд диагностики ВНК была изготовлена ИКД с прямоугольной формой электродных пластин. ИКД облучалась потоком 14 МэВ нейтронов на нейтронном генераторе НГ24М. Приводятся результаты измерений анизотропии чувствительности ИКД в зависимости от ориентации детектора и нейтронного источника.

В разделе 3.3 приведено описание алмазного детектора, разработанного для нужд диагностики ВНК. Каждый блок детектирования ВНК содержит два алмазных детектора, расположенных друг над другом [A11]. В конструкции нижнего детектора предусмотрены 4 алмазных пластины, размер каждой из которых $4,5 \times 4,5 \times 0,5$ мм³. Верхний детектор содержит одну алмазную пластину с размерами $4,5 \times 4,5 \times 0,1$ мм³. В конструкции алмазного детектора выполнен ряд оптимизаций, позволяющий уменьшить габариты блока детектирования, а также применены некоторые технические решения для работы в условиях ВНК.

В разделе 3.4 приводятся результаты экспериментов по облучению ИКД и алмазных детекторов нейтронами при воздействии высоких температур. В результате испытаний измерялся отклик алмазных детекторов и ИКД от 14 МэВ нейтронов при различных температурах в диапазоне от комнатной температуры до $300^\circ C$. Как видно из результатов измерений при температурах до $200^\circ C$ включительно спектральные отклики алмазного детектора не претерпевают существенных изменений, а отклики ИКД остаются стабильными во всем измеряемом диапазоне [A15]. Во время работы диагностики температура не превышает 100° [A7, A13].

Раздел 3.5 посвящен исследованию воздействия длительных термодинамических нагрузок на работу алмазного детектора. Во время работы

ИТЭР запланировано 500 циклов технологического прогрева до температуры 250°C . Алмазный детектор подвергался аналогичным нагрузкам. Всего было выполнено 500 циклов нагрева детектора, после чего были измерены отклики детектора от калибровочного источника ионизирующего излучения и от нейтронного генератора. По результатам испытаний можно заключить, что технологический прогрев вакуумной камеры ИТЭР не является препятствием для работы детекторов.

В разделе 3.6 приведены результаты исследования алмазного детектора на радиационную стойкость. Испытания проводились с целью измерения радиометрических параметров детектора в аттестованном поле 14 МэВ нейтронов при наборе флюенса нейтронов до $8 \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2$. В основном режиме работы токамака в месте расположения детекторов ВНК ожидается крайне высокая максимальная плотность потока нейтронов: свыше $10^{10} \text{ н/(см}^2\text{с)}$ для нижней ВНК и свыше $10^{11} \text{ н/(см}^2\text{с)}$ для верхней подсистемы. По результатам испытаний видно, что при наборе флюенса до $4 \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2$ спектральный отклик алмазного детектора остается без изменений. При дальнейших наборах флюенса происходит уширение пика (n, α) реакции на ^{12}C и уменьшение общей скорости счета [A17].

В разделе 3.7 описываются результаты исследования влияния линии связи на передачу сигнала алмазного детектора. Моделировалась линия связи, аналогичная линии связи на токамаке ИТЭР. Принципиальным отличием нейтронных диагностик ИТЭР от подобных диагностик, реализованных на других токамаках является размещение детекторов внутри вакуумной камеры. Внутри вакуумной камеры для передачи сигналов ВНК могут использоваться только кабели с минеральной изоляцией. Были проведены испытания компонентов линии связи ВНК. По результатам испытаний можно заключить, что наибольший вклад в суммарную относительную погрешность измерений электронным аналоговым трактом, вносит кабель с минеральной изоляцией марки РК316 50-3-71 [A10].

Раздел 3.8 посвящен разработке алгоритмов обработки сигналов ВНК. Система ВНК производит колоссальный объем данных (около 50 Гб/с), поэтому предлагается обработка исходных импульсов диагностики с использованием ПЛИС. В ВНК планируется использовать АЦП NI 5772 с частотой дискретизации 800 МВывб/с сигнал с которого подается на реконфигурируемую плату цифрового ввода / вывода NI FlexRIO, имеющую модуль ПЛИС Xilinx Kintex-7. Для данной задачи был разработан алгоритм обработки импульсов, включающий в себя следующие операции: коррекция базовой линии; обнаружение импульсов и расчет пиков; исключение наложений событий; расчет скорости счета и амплитудного спектра [A1, A16].

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования динамики выхода быстрых нейтронов в разрядах токамака JET при развитии переходных процессов в плазме. В 2011 году на JET была

установлена бериллиевая первая стенка с вольфрамовым дивертором, так называемая «ITER-like wall» [11]. В период с 2012 года по 2020 токамак работал, в том числе, с DD плазмой и общий выход DD нейтронов достигал 10^{16} [12]. На период кампании на установке JET было поставлено два измерительных канала на основе алмазного детектора. В эксперименте измерялся общий нейтронный выход и по соотношению концентраций DD и DT нейтронов, оценивалась эффективность удержания трития, рожденно-го в DD реакции при различных режимах работы токамака.

Раздел 4.1 посвящен описанию эксперимента по измерению динамики выхода нейтронов. Приведена измерительная схема. Детекторы, оснащенные альфа-источниками и преусилителями были установлены в зале токамака JET в главном горизонтальном порту как можно ближе к порту токамака. Во время кампании плотность потока нейтронов в месте нахождения детектора достигала 10^8 $n/(см^2c)$, а уровень счета на детекторах составлял 10^5 Гц, что позволило получить низкую статистическую погрешность. Детекторы в основном работали в качестве пороговых счетчиков. Временное разрешение измерительной системы составило 12 мс [A2].

В разделе 4.2 описывается методика измерения интенсивности нейтронного источника с помощью алмазного детектора. Амплитудный спектр связан с энергетическим спектром нейтронов следующим соотношением [24]:

$$W(E_p) = \frac{dN(E_p)}{d(E_p)} = \int_{E_{min}^l}^{E_{max}^l} \alpha \sum_i \sigma_i f_i(\mu, E_1) \frac{\partial \mu}{\partial E_p} F(E_1) dE \quad (1)$$

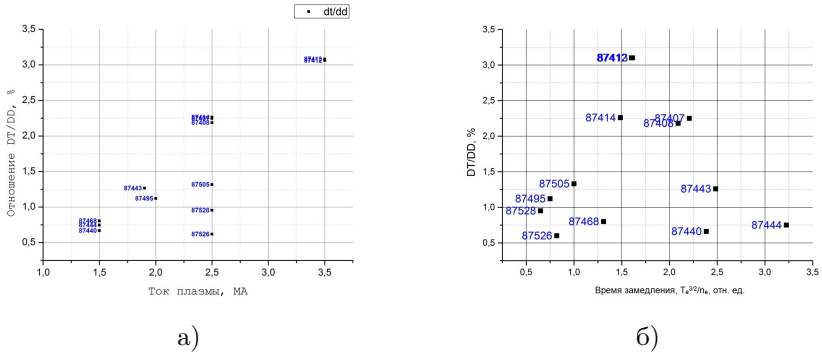
Здесь $F(E_1)$ — спектр нейтронов, общее число нейтронов, $\alpha = nVt$, где n — концентрация углерода, V — объем детектора, t — время экспозиции, E_1 — энергия нейтрона, i — процесс взаимодействия, $\sigma_i(E_1)$ — его полное сечение, $f_i(\mu, E_1)$ — табличная функция плотности вероятности нейтронов рассеяться в косинус угла от μ до $d\mu$.

В разделах 4.3 и 4.4 приведены результаты расчета полного потока DD и DT нейтронов, измеренные алмазными детекторами в различных разрядах токамака JET. Для расчета отклика детектора с помощью кода MCNPX был получен спектр нейтронов $F(E_1)$ в точке облучения. Моделировался плазменный нейтронный источник с уширением, соответствующим температуре 20 кэВ [A2]. Измеренный выход DD-нейтронов совпал с хорошей точностью с калиброванным сигналом нейтронных мониторов, состоящем из двух ИКД на основе ^{235}U и ^{238}U .

Представлены также результаты измерения выхода DT нейтронов, полученных в результате рождения ионов трития в DD реакции [A4]. Ионы трития рождаются с энергией в 1,01 МэВ используя канал реакции $D + D = T + p$.

Раздел 4.5 посвящен результатам исследования и удержания и термализации ионов трития на основе выхода DT нейтронов в DD реакции. Ионы

третия описывают орбиты с ларморовскими радиусами $r = \sqrt{2E \cdot m}/qB$. Для магнитного поля $B = 3 \text{ Тл}$ радиус $r = 8.4 \text{ см}$. Обычно в токамаке ионы двигаются по тору, следовательно, ширина орбит обратно пропорциональна полоидальному магнитному полю. В итоге, в разрядах с большим током плазмы удержание ионов лучше. В диапазоне энергий ионов от 1 МэВ до 170 кэВ (максимум реактивности DT реакции) доминирует процесс замедления на электронах, и время замедления пропорционально $T_e^{3/2}/n_e$. Зависимость отношения выхода DT и DD нейтронов показана на рисунке 2.



задержкой по отношению к времени рождения ионов трития. Это соответствует времени замедления ионов от энергии 1 МэВ до максимума реактивности DT реакции (около 170-200 кэВ). Данную задержку можно также наблюдать в эксперименте. Для получения значения времени была выполнена процедура свертки сигналов выходов DD и DT нейтронов для разряда №87413. В данном разряде время составило $\tau = 0.22$ с.

Раздел 4.7 посвящен исследованию динамики возникновения тока убегающих электронов по измерениям жесткого рентгеновского излучения. Установленный алмазный детектор в октанте 6 зала токамака JET зарегистрировал значительные всплески жесткого рентгеновского излучения, сопровождающие срыв тока плазменного шнура. Это произошло после падения электронной плотности и создания условий для возникновения явления убегающих электронов. Подобные условия возникали также в некоторых режимах на начальном участке роста тока плазмы, что также было зарегистрировано.

В **пятой главе** описывается проект диагностики «Многоканальный нейтронный коллиматор» для токамака с реакторными технологиями TRT.

В разделе 5.1 приведено общее описание проекта установки TRT. Токамак с реакторными технологиями (TRT) представляет собой квазистационарную термоядерную плазменную установку с длительностью разряда более 100 с. Отличительная особенность токамака — использование высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в электромагнитной системе. В целом, прогнозируется, что в токамаке TRT выход нейтронов будет достигать 5×10^{17} нейтронов/с для D-D плазмы и свыше 10^{18} нейтронов/с для D-T плазмы[7].

Раздел 5.2 посвящен описанию конструкции многоканального нейтронного коллиматора TRT [A8]. В данной работе предлагается разместить нейтронную камеру внутри герметичного кожуха, заходящего вглубь патрубков токамака. Таким образом, принципиальным отличием от нейтронных камер ИТЭР является вневакуумное размещение детекторов и нейтронной защиты. В качестве материалов коллиматоров предлагается использовать нержавеющей сталь (передний слой защиты, толщина 200 мм) и борированный полиэтилен высокой плотности (толщина 600 мм). Общий вид нейтронной камеры представлен на рисунке 3.

В разделе 5.3 приведено описание модели нейтронного источника и результаты расчета потока нейтронов в каналах коллиматора. Для оценки эффективности коллиматоров, а также нейтронных потоков и спектров в месте размещения детекторов была построена расчетная модель токамака, включающая нейтронную камеру и плазменный нейтронный источник. При моделировании источника для упрощения принято предположение о постоянстве интенсивности нейтронного излучения вдоль магнитной поверхности. Для задания геометрии магнитных поверхностей

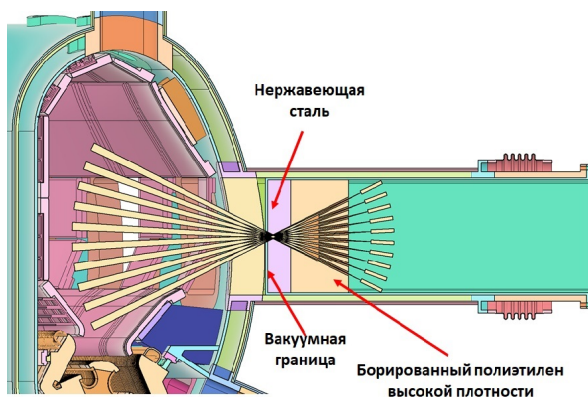


Рис. 3 — Проект многоканального нейтронного коллиматора TRT

использовалось упрощенное трехмоментное приближение решения уравнения Грэда–Шафранова. Для проведения нейтронного анализа и расчета нейтронных потоков в месте расположения детекторов на основе САД модели была создана эталонная модель токамака, предназначенная для расчетов переноса нейтронного излучения методом Монте-Карло. С помощью заданного нейтронного источника и эталонной модели токамака были рассчитаны нейтронные потоки и спектры в каналах коллиматоров. По результатам расчетов в сценарии с DD плазмой плотность потока прямых нейтронов в каналах коллиматоров достигает 10^7 $n/(см^2c)$, а построенные линии наблюдения охватывают области плазмы с различной интенсивностью нейтронного источника.

Раздел 5.4 посвящен описанию детекторов диагностической системы «Многоканальный нейтронный коллиматор» TRT. Предполагается работа токамака TRT как с DD, так и с DT плазмой, при этом интенсивность нейтронного источника будет меняться на несколько порядков, что требует работы нейтронных детекторов в широком динамическом диапазоне. Помимо измерения непосредственно профиля нейтронного источника необходимо также измерять и другие параметры: топливное отношение (или отношение интенсивности излучений DD/DT нейтронов), спектр нейтронов, полный нейтронный выход, профиль ионной температуры (в случае максвелловского распределения). Для различных режимов работы токамака предлагается использовать детекторы с различной чувствительностью. Наиболее предпочтительными кандидатами в качестве детекторов нейтронной камеры выглядят хлор-содержащие сцинтилляторы [25] и детекторы на основе CVD монокристаллического алмаза.

В разделе 5.5 приведено описание дополнительных линий наблюдения для многоканального нейтронного коллиматора TRT необходимых,

для увеличения точности восстановления пространственной интенсивности нейтронного источника. Особенно привлекательной выглядит идея использовать для этого вертикальные патрубки токамака. Без интеграции в пространство патрубка можно реализовать также дополнительные горизонтальные линии наблюдения, для охвата центральной плазменной области.

В разделе 5.6 приведены измеряемые с помощью диагностической системы плазменные параметры. На основе модели нейтронного источника и результатов расчета плотностей потоков нейтронов на детекторах сделана оценка динамических диапазонов измерений. Измеряемые диагностикой параметры и диапазоны измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Требования к измерениям диагностической системы «Многоканальный нейтронный коллиматор»

№	Изменяемые параметры	Временное разрешение	Динамический диапазон измерений
1	Удельная интенсивность нейтронного источника	0,001 с – 0,1 с	$10^8 - 10^{12} \text{ н}/(\text{см}^3 \text{ с})$
2	Отношение выходов DT/DD нейтронов	0,1 с	0.01-10
3	Спектр нейтронов	0,1 с	2-16 МэВ
4	Полный нейтронный поток	0,001 с	$10^{14} - 10^{18} \text{ н}/\text{с}$
5	Ионная температура	0,1 с	1-10 кэВ

В **заключении** приведены основные результаты работы.

В работе приведены результаты разработки диагностической системы ИТЭР «Вертикальная нейтронная камера». При разработке ВНК необходимо было решить целый ряд технологических проблем: диагностическая система должна работать в условиях сильных статических и динамических механических нагрузок, в процессе работы система подвергается значительному радиационному нагреву, нейтронные детекторы размещаются в условиях высокого вакуума. Из-за сильной активации окружающих конструкций диагностика должна обслуживаться системой удаленного управления без участия людей. Внутри портов ограниченно пространство для размещения достаточного количества нейтронной защиты и проведенный расчет переноса нейтронного излучения показал присутствие значительного количества фоновых нейтронов в каналах

диагностики. Поэтому в работе было принято значительное количество оптимизаций конструкций коллиматоров и детекторов, позволившее в несколько раз улучшить отношение сигнал/фон. Компоненты коллиматоров нижней ВНК находятся в трех совершенно независимых друг от друга компонентах: модуле бланкета, диверторной кассете и диагностическом рэке. Поэтому была предложена система компенсации погрешностей установки компонентов коллиматоров. Дополнительно был выполнен анализ влияния относительных смещений компонентов коллиматоров на сигнал ВНК и показано, как учесть их при работе диагностики.

Для диагностики ВНК ИТЭР был разработан блок детектирования быстрых нейтронов (БДБН). БДБН ВНК содержит две ионизационные камеры деления и два алмазных детектора. БДБН обеспечивает измерение плотности потока нейтронов в диапазоне 10^5 до 10^{11} $n/(см^2с)$. В работе были проведены результаты исследования отклика ВНК, в условиях, приближенных к условиям в каналах коллиматоров ВНК. Экспериментально определено влияние условий эксплуатации на чувствительность и энергетическое разрешение детекторов.

В работе были разработаны и испытаны компоненты системы сбора данных ВНК. Для алмазного детектора моделировалась линия связи диагностики ВНК, включающая в себя триаксиальный кабель с минеральной изоляцией длиной, коаксиальную линию связи, аналоговую оптическую гальваническую развязку. В результате испытаний был определен вклад каждого компонента в суммарную относительную погрешность измерений. Была разработана и испытана измерительная система, позволяющая обрабатывать в реальном времени сигналы нейтронного детектора со скоростью оцифровки 800 МВыб/с. Это позволило достичь временного разрешения в 1 мс, что необходимо для исследования переходных процессов, происходящих в плазме токамака.

Измерительная система на основе разработанного для диагностики ВНК алмазного детектора была установлена в зале токамака JET. Созданная диагностическая система позволила определить выход нейтронов DD и DT в сценариях с различными параметрами плазмы. Используя данные с алмазного нейтронного монитора были определены сценарии с лучшим удержанием трития, рожденным в DD-реакции, и выполнена оценка времени его замедления. Измеренный выход DD-нейтронов совпал с хорошей точностью с калиброванным сигналом нейтронных мониторов, состоящем из двух ИКД на основе ^{235}U и ^{238}U . Также алмазный нейтронный монитор в области низких энергий спектра отклика детектора смог обнаружить сильные всплески жесткого рентгеновского излучения, создаваемые убегающими электронами.

В рамках данной работы была создана концептуальная модель нейтронной камеры TRT, состоящая из 10 линий наблюдения и включающая каналы коллиматоров и набор нейтронных детекторов. Предложена

вневакуумная конструкция патрубка для размещения нейтронных коллиматоров, что позволяет значительно упростить интеграцию нейтронных детекторов диагностики и использовать более широкий спектр материалов нейтронной защиты. В работе показано, что при выходе DD нейтронов 10^{16} n/s стоит ожидать плотность нейтронного потока на детекторах до 10^7 $n/(см^2 c)$. В данных условиях для работы как с DD, так и с DT плазмой в качестве детекторов нейтронной камеры предлагается использовать CVD алмазные детекторы и сцинтилляторы на основе $LaCl_3$ и стибьбена. По результатам работы были определены динамические диапазоны измеряемых диагностикой плазменных параметров.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК и/или Scopus и Web of Science

- A1. Применение цифрового алмазного спектрометра быстрых атомов перезарядки на токамаке JET / В.А. Красильников, Д.А. Скопинцев, Г. Е. Немцев и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. — 2012. — Окт. — Т. 4. — С. 97–102.
- A2. Diagnostic of fusion neutrons on JET tokamak using diamond detector / G. Nemtsev [et al.] // AIP Conference Proceedings. — 2014. — Vol. 1612, no. 1. — P. 93–96.
- A3. Нейтронный анализ Вертикальной нейтронной камеры (ВНК) ИТ-ЭР / А.А. Борисов, Н.А. Дерябина, Г.Е. Немцев, и др. // Приборы и техника эксперимента. — 2014. — №2. — С. 5-12.
- A4. Study of the triton-burnup process in different JET scenarios using neutron monitor based on CVD diamond / G. Nemtsev [et al.] // Review of Scientific Instruments. — 2016. — Vol. 87, no. 11. — P. 3–6.
- A5. Engineering issues on the diagnostic port integration in ITER upper port 18 / S. Pak, L. Bertalot, G. Nemtcev, et al. // Fusion Engineering and Design. — 2016. — Vol. 109 – 111.
- A6. Optimization of the ITER vertical neutron camera detectors and collimators / R. Rodionov, G. Nemtcev, R. Barnsley, et al. // Fusion Engineering and Design. — 2021. — Vol. 166. — P. 112341.
- A7. Strength estimation of the ITER Lower Vertical Neutron Camera at thermal loading / V. Modestov, A. Lobachev, G. Nemtcev et al. // Fusion Engineering and Design. — 2021. — Vol. 170. — P. 112501.
- A8. Многоканальный нейтронный коллиматор TRT / Г. Е. Немцев [и др.] // Физика плазмы. — 2022. — Дек. — Т. 48, № 12. — С. 1166–1173.

В тезисах конференций

- A9. Concept Design and Integration Aspects of ITER Vertical Neutron Camera / L. Bertalot, N. Yukhnov, G. Nemtcev [et al.] // *Proceedings of Science*. — 2015.
- A10. Тестирование компонентов системы регистрации сигналов диагностики вертикальной нейтронной камеры ИТЭР / В.М. Голачев, Г.Е. Немцев, Е.Ю. Миронова [и др.] // Тезисы докладов XLVI Звенигородской конференции. — 2019.
- A11. Разработка алмазного детектора для ВНК ИТЭР / Р.Р. Хафизов, Г.Е. Немцев, В.Н. Амосов [и др.] // Тезисы докладов XVIII всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы". — 2019.
- A12. Предварительный проект системы сбора данных и управления диагностики Вертикальная Нейтронная Камера / С.С. Портоге, Г. Е. Немцев, Е.Ю. Миронова [и др.] // Тезисы докладов XVIII всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы". — 2019.
- A13. Analyses and structure integrity estimation of the Upper Vertical Neutron Camera / A. Smirnov, V. Modestov, G. Nemtcev et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — Nov. — Vol. 1383. — P. 012007.
- A14. Расчёт радиационной защиты электронных компонентов диагностики Вертикальная Нейтронная Камера / Д.А. Кумпилов, Р.Н. Родионов, Г.Е. Немцев // Тезисы докладов XLVII Звенигородской конференции. — 2020.
- A15. Разработка диагностической системы ИТЭР вертикальная нейтронная камера в 2020 году / Г.Е. Немцев [и др.] // Тезисы докладов XLVIII Звенигородской конференции. — 2021.
- A16. Development of a real-time signal processing unit for diamond detectors of ITER Vertical Neutron Camera / M. Zhuravlev, G. Nemtcev, N. Nagorny et al. // *EPJ Web of Conferences*. — 2021. — Jan. — V. 253. — P. 03002.
- A17. Статус разработки диагностики Вертикальная нейтронная камера в 2021 году / Г.Е. Немцев [и др.] // Тезисы докладов XIX всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы". — 2021.
- A18. Влияние смещения коллиматоров на измерения детекторов Вертикальной нейтронной камеры ИТЭР / Д.А. Кумпилов, Р.Н. Родионов, Г.Е. Немцев // Тезисы докладов XIX всероссийской конференции "Диагностика высокотемпературной плазмы". — 2021.

Список литературы

1. Neutron diagnostics for reactor scale fusion experiments: a review of JET systems / G. Bonheure [et al.] // PoS. — 2006. — Jan.
2. Fusion neutron diagnostics on ITER tokamak / L. Bertalot [et al.] // Journal of Instrumentation - J INSTRUM. — 2012. — Apr. — Vol. 7.
3. First measurement of neutron emission profile on JT-60U using Stilbene neutron detector with neutron-gamma discrimination / M. Ishikawa [et al.] // Review of Scientific Instruments. — 2002. — Vol. 73, no. 12. — P. 4237—4242.
4. Fast detection of 14 MeV neutrons on the TFTR neutron collimator / S. Goeler [et al.] // Review of Scientific Instruments. — 1996. — Mar. — Vol. 67. — P. 473—484.
5. The JET neutron emission profile monitor / J. M. Adams [et al.] // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. — 1993. — Vol. 329. — P. 277—290.
6. The ITER radial neutron camera: An updated neutronic analysis / F. Moro [et al.] // Fusion Engineering and Design. — 2009. — Vol. 84, no. 7. — P. 1351—1356. — Proceeding of the 25th Symposium on Fusion Technology.
7. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики / А. Красильников [и др.] // Физика плазмы. — 2021. — Т. 47, № 11. — С. 970—985.
8. Chapter 1: Overview and summary / M. Shimada [et al.] // Nuclear Fusion. — 2007. — June. — Vol. 47. — S1.
9. Chapter 7: Diagnostics / A. Donne [et al.] // Nuclear Fusion. — 2007. — June. — Vol. 47. — S337.
10. High fusion performance from deuterium-tritium plasmas in JET / M. Keilhacker [et al.] // Nuclear Fusion. — 1999. — Feb. — Vol. 39, no. 2. — P. 209.
11. JET ITER-like wall - Overview and experimental programme / G. Matthews [et al.] // Physica Scripta. — 2011. — Dec. — Vol. 2011. — P. 014001.
12. Overview of JET results for optimising ITER operation / J. Mailloux [et al.] // Nuclear Fusion. — 2022. — Jan. — Vol. 62.
13. *Jarvis, O.* Fusion neutron energies and spectra / O. Jarvis // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 1994. — Feb. — Vol. 36, no. 2. — P. 209—244.

14. *Brysk, H.* Fusion neutron energies and spectra / H. Brysk // Plasma Physics. — 1973. — Oct. — Vol. 15, no. 7. — P. 611.
15. *Belle, P. van.* Basic and Advanced Diagnostic Techniques for Fusion Plasmas / P. van Belle, G. Sadler // Proceedings of the course and workshop held in Varenna. — 1986. — Sept. — Vol. 3. — P. 767.
16. Fusion Neutron Flux Monitor for ITER / Y. Jinwei [et al.] // Plasma Science and Technology. — 2008. — Apr. — Vol. 10, no. 2. — P. 141.
17. A conceptual project for a divertor monitor of the neutron yield in the ITER / Y. A. Kashchuk [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. — 2006. — Vol. 49. — P. 179—186.
18. Design of microfission chamber for ITER operation / M. Ishikawa [et al.] // Review of Scientific Instruments. — 2008. — Vol. 79, no. 10. — P. 10E507.
19. Conceptual design of the high resolution neutron spectrometer for ITER / M. Scholz [et al.] // Nuclear Fusion. — 2019. — Apr. — Vol. 59, no. 6. — P. 065001.
20. Development of the NPA based diagnostic complex in ITER / V. Afanasyev [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2022. — July. — Vol. 17, no. 07. — P. C07001.
21. *Воробьев, В.* Методика определения времени сбора заряда и среднего заряда в импульсе ионизационной камеры деления / В. Воробьев, С. Обудовский, Ю. Кащук // Измерительная техника. — 2019. — Февр. — № 2. — С. 72.
22. Charge-carrier properties in synthetic single-crystal diamond measured with the transient-current technique / H. Pernegger [et al.] // Journal of Applied Physics - J APPL PHYS. — 2005. — Apr. — Vol. 97.
23. Chapter 12: Generic Diagnostic Issues for a Burning Plasma Experiment / G. Vayakis [et al.] // Fusion Science and Technology. — 2008. — Vol. 53, no. 2. — P. 699—750.
24. Fast neutron diamond spectrometer / V. N. Amosov [et al.] // Diamond and Related Materials. — 2011. — Vol. 20, no. 8. — P. 1239—1242.
25. Novel LaCl₃ (Ce)-based spectrometer for deuterium plasma neutron diagnostics / T. Kormilitsyn [et al.]. — 2021. — Apr.

Немцев Григорий Евгеньевич

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИКИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ
АНАЛИЗА ПРОФИЛЯ ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОКАМАКЕ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____._____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____