

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Ковалев Андрей Олегович

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ
МОЩНОСТИ ПЛАЗМЫ ИТЭР НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ
ПОТОКА НЕЙТРОНОВ**

Специальность 1.3.9 – Физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Автор:



Москва – 2022

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

Научный руководитель:

Кашук Юрий Анатольевич,
кандидат физико-математических наук,
Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Нейтронной и Спектроскопической Диагностики, начальник отдела

Официальные оппоненты:

Бурдаков Александр Владимирович
доктор физико-математических наук, с.н.с.
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория 10, главный научный сотрудник, советник дирекции

Саврухин Пётр Всеволодович
доктор физико-математических наук,
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», лаборатория физики горячей плазмы Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий, ведущий научный сотрудник

Шевелев Александр Евгеньевич
кандидат физико-математических наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, циклотронная лаборатория, и.о. старшего научного сотрудника

Защита состоится «29» марта 2023 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МИФИ.1.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

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



Степаненко А.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Количество термоядерной энергии, которую токамак способен производить, напрямую зависит от количества термоядерных реакций, происходящих в его плазме. Чем больше размер вакуумной камеры токамака, тем больше объем плазмы и, следовательно, тем больше потенциал термоядерной энергии.

Токамак ИТЭР с объемом плазмы в десять раз больше, чем у самой большой машины, работающей сегодня, станет уникальным экспериментальным инструментом, способным к более длительному удержанию плазмы. Машина была разработана специально для следующих целей:

- 1) достичь дейтериево-тритиевой плазмы, в которой условия синтеза поддерживаются в основном за счет внутреннего термоядерного нагрева,
- 2) генерировать 500 МВт термоядерной мощности в своей плазме для длинных импульсов,
- 3) внести вклад в демонстрацию интегрированной работы технологий для термоядерной электростанции
- 4) провести пробное воспроизводство трития,
- 5) продемонстрировать характеристики безопасности термоядерного устройства.

ИТЭР будет оснащен большим набором диагностических приборов для проведения измерений, необходимых для контроля, оценки и оптимизации характеристик плазмы в ИТЭР, а также для дальнейшего понимания физики плазмы.

Из-за суровых условий внутри вакуумного сосуда эти системы справятся с рядом явлений, ранее не встречавшихся при диагностике, при этом работая с большой точностью. Уровни потока нейтральных частиц, потока нейтронов и флюенса, соответственно, примерно в 5, 10 и 10 000 раз выше, чем самые суровые, с которыми сталкиваются современные установки. Длина импульса реакции синтеза — или количество времени, в течение которого реакция поддерживается, — примерно в 100 раз больше.

Современные требования Международной Организации ИТЭР к погрешности измерения параметров горения плазмы и уникальные условия эксплуатации систем обуславливают изобретение новых подходов организации диагностики плазмы.

Одним из основных параметров горения высокотемпературной плазмы является термоядерная мощность. Сравнивая величину термоядерной мощности с затраченной мощностью на поддержание реакции термоядерного синтеза, можно сделать вывод о целесообразности использования данной машины в качестве источника энергии и термоядерных нейтронов.

В таблице 1 представлены требования, предъявляемые Международной организацией ИТЭР к измерениям выхода нейтронов и термоядерной

мощности мониторами нейтронного потока.

Таблица 1 – Требования, предъявляемые к измерениям параметров плазмы ИТЭР

Параметр	Состав плазмы	Диапазон	Погрешность, %
Выход нейтронов, н/с	DD	10^{14} — 10^{18}	20
	DT	10^{18} — $3,2 \cdot 10^{20}$	10
Термоядерная мощность, МВт	DD	0,1—3	20
	DT	3—900	10

Основными средствами измерения термоядерной мощности в ИТЭР являются три системы: Диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП) [1], Монитор нейтронного потока (МНП) [2] и Миниатюрные камеры деления (МКД) [3]. Данные диагностики будут определять термоядерную мощность и выход нейтронов дейтериевой и дейтерий-тритиевой плазмы на основе измерений потока нейтронов.

Завершена разработка конструкции данных систем, что сделало возможным проведение исследования погрешности измерения параметров горения плазмы ИТЭР.

Основные цели данной работы

1. Построить достоверную модель измерения термоядерной мощности и выхода нейтронов мониторами нейтронного потока ИТЭР.
2. Исследовать величину погрешности измерения термоядерной мощности и выхода нейтронов DD и DT плазмы ИТЭР.
3. Минимизировать погрешность определения термоядерной мощности и выхода нейтронов высокотемпературной плазмы ИТЭР.

Для достижения поставленных целей потребовалось решить следующие **задачи**:

1. Построить трехмерную модель диагностик ДМНП, МНП, МКД в токамаке ИТЭР для вычисления транспорта ионизирующего излучения методом Монте-Карло.
2. Провести моделирование сигналов детекторов диагностик и моделирование обработки сигналов системами сбора данных диагностик ДМНП, МНП, МКД, работающих в условиях горения DD и DT плазмы ИТЭР.
3. Разработать подходы компенсации систематической ошибки измерения термоядерной мощности и выхода нейтронов мониторами нейтронного потока ИТЭР.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Предложена методика моделирования плотности потоков нейтронов в месте расположения детекторов нейтронных диагностик ИТЭР на основе набора функций Грина, описывающих отклик детекторов от объёмного источника термоядерных нейтронов. Расчёты с использованием оптимизированной методики в 3 раза уменьшают количество необходимых вычислений и позволяют получить результат с погрешностью, не превышающей статистическую погрешность для прямого расчёта объёмного плазменного источника нейтронов методом Монте-Карло.
2. Предложенная методика моделирования сигналов детекторов нейтронов высокотемпературной плазмы с учётом изменения её параметров позволяет вычислять значения измерений термоядерной мощности за время меньше 1 мс.
3. Результаты моделирования процесса измерения термоядерной мощности диагностиками ДМНП, МНП, МКД при различных параметрах плазмы ИТЭР подтверждают, что термоядерная мощность может быть измерена с погрешностью, удовлетворяющей требованиям Международной организацией ИТЭР. Систематическая погрешность определения термоядерной мощности диагностиками ДМНП, МНП и МКД не превышает 10%.
4. Оптимизированная методика определения термоядерной мощности высокотемпературной плазмы токамака ИТЭР по показаниям диагностик ДМНП, МНП, МКД учитывает положение плазменного шнура, что позволило уменьшить систематическую погрешность измерений до 5%.

Научная новизна работы

1. Впервые реализовано и обосновано применение метода функции Грина для моделирования радиационных полей в зоне расположения детекторов диагностик нейтронов плазмы токамака ИТЭР.
2. Впервые проведено моделирование скорости реакции деления чувствительного материала детекторов диагностик ДМНП, МНП, МКД для сценария DT плазмы ИТЭР в зависимости от времени и для различных конфигураций DD плазмы ИТЭР с учётом динамического диапазона диагностик и требуемого временного разрешения.
3. Впервые проанализирована величина систематической и статистической погрешности измерений термоядерной мощности диагностиками ДМНП, МНП, МКД при различных параметрах плазмы ИТЭР.
4. Впервые реализован алгоритм совместного измерения термоядерной мощности диагностиками ДМНП, МНП, МКД.

Практическая значимость работы

1. На основании физико-математической модели процесса определения термоядерной мощности токамака реактора ИТЭР обосновано соответствие возможностей диагностик ДМНП, МНП и МКД предъявляемым к ним требованиям Международной организацией ИТЭР.
2. Предложенная методика определения термоядерной мощности плазмы токамака реактора ИТЭР позволяет минимизировать погрешность измерения термоядерной мощности и полного выхода нейтронов.
3. Алгоритм, реализованный для моделирования процесса измерения, может быть использован для планирования калибровочной компании детекторов нейтронных диагностик и интерпретации определения термоядерной мощности плазмы токамака реактора ИТЭР.

Достоверность полученных результатов обеспечивается их согласованностью с имеющимися в литературе данными, а также совпадением результатов, полученных различными методами. Результаты работы неоднократно представлялись на совещаниях в Международной Организации ИТЭР, на российских и международных конференциях и опубликованы в реферируемых журналах.

Личный вклад автора состоит в постановке целей и задач исследований, анализе полученных результатов. В постановке отдельных задач исследований и обсуждении результатов активное участие принимали Кашук Ю.А. Портнов Д.В., Родионов Р.Н. и Полевой А.Р.

Следующие работы выполнены автором лично или при его определяющем вкладе:

- разработка трёхмерных моделей транспорта ионизирующего излучения диагностик ДМНП, МНП и МКД в токамаке ИТЭР,
- разработка алгоритмов моделирования радиационных полей в зоне расположения детекторов и сигналов детекторов диагностик ДМНП, МНП и МКД,
- моделирование работы системы обработки сигналов детекторов диагностик ДМНП, МНП, МКД, моделировании измерения термоядерной мощности и выхода нейтронов плазмы ИТЭР диагностикой ДМНП, МНП и МКД как независимых друг от друга систем, так и работающих совместно,
- сбор и анализ результатов моделирования процесса измерения термоядерной мощности и выхода нейтронов термоядерной плазмы ИТЭР.

Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все

результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Апробация работы

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

- ITER Neutronics meeting (2016);
- Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics (2016);
- Конференция Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (2016);
- Конференция Современные средства диагностики плазмы и их применение НИЯУ «МИФИ» (2016);
- Научная конференция МФТИ (2016);
- Конференция Диагностика высокотемпературной плазмы (2017, 2021)
- Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС (2017, 2018, 2020);
- Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике» (2017);
- The European Physical Society Conference on Plasma Physics (2018);
- Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (2021).

Полученные результаты также представлялись и обсуждались на международных совещаниях по диагностике ИТЭР.

Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 19 печатных работах, 5 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, 14 – в тезисах докладов. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованной литературы. Полных объём диссертации составляет 124 страницы, включая 47 рисунков и 20 таблиц. Список литературы содержит 70 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основные цели работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту. Описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлена информация о личном вкладе автора, апробации работы, публикациях и структуре диссертации.

Первая глава проводится обзор физических характеристик термоядерных реакций высокотемпературной плазмы с выделением нейтронов,

описана модель источника нейтронов термоядерной плазмы ИТЭР. Приведено описание основ моделирования транспорта ионизирующего излучения методом Монте-Карло. Представлены основные методы диагностики высокотемпературной плазмы, описана калибровка расчётной модели экспериментов с детекторами термоядерных нейтронов и сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными.

В разделе 1.1 рассматриваются физические характеристики термоядерных реакций высокотемпературной плазмы с выделением нейтронов. Приведены данные микроскопического сечения DD, DT и TT реакции синтеза [4], как функции энергии реагирующих частиц. Для высокотемпературной плазмы введено понятие реактивности реакций синтеза, которая определяет скорость протекания реакций синтеза в единице объёма плазмы, как функция ионной температуры реагирующих изотопов водорода. Описано понятие термоядерной мощности плазмы. Обозначена её связь с выходом нейтронов DD и DT плазмы.

На рисунке 1 представлены реактивности термализованных ионов плазмы для DD-, DT- и TT-синтеза, как функция ионной температуры.

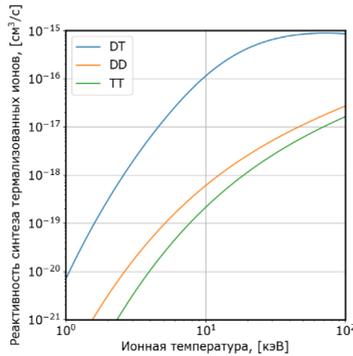


Рисунок 1 – Реактивности термализованных ионов плазмы при различной ионной температуре [5]

Скорость реакции синтеза R_{12} в единице объёма среды, состоящей из ионов «1» и «2», принято выражать уравнением 1 [5].

$$\frac{dR_{12}}{dV} = \frac{1}{1+\delta_{12}} n_1 n_2 \langle \sigma \cdot v \rangle_{12}, \quad (1)$$

где:

$n_{1/2}$, ионов/см³ – концентрация реагирующих ионов «1» или «2»;
 δ_{12} – символ Кронекера, численно равный 0 в случае, когда ионы «1» и «2» разного типа, и равный 1, если реагирующие ионы одного типа.

В разделе 1.2 описана модель высокотемпературной плазмы ИТЭР, как источника нейтронов. В рамках данной модели источник нейтронов описывается в приближении магнитных поверхностей – на данной магнитной поверхности параметры плазмы постоянны. Источник параметризуется RZ-геометрией равновесия и пространственным распределением источников нейтронов в полоидальном сечении плазмы в разные моменты времени. Источник тороидально симметричен. Принято приближение, в рамках которого параметры источника нейтронов постоянны между двумя магнитными поверхностями. Приведены различные сценарии горения DD и DT плазмы ИТЭР, отмечены их особенности, существенные для процесса моделирования измерений термоядерной мощности и выхода нейтронов мониторами нейтронного потока. Сценарии, рассмотренные в данной работе, были рассчитаны сотрудниками Международной организации ИТЭР [6].

Описание сценариев DD плазмы доступно в базе данных IMAS [7]. DD плазма как источник нейтронов представляет исследовательский интерес по нескольким причинам, например:

- Многоканальное образование нейтронов (DD и DT).
- Большое разнообразие пикированности профиля эмиссии нейтронов (два примера возможных профилей эмиссии нейтронов представлены на рисунке 2).

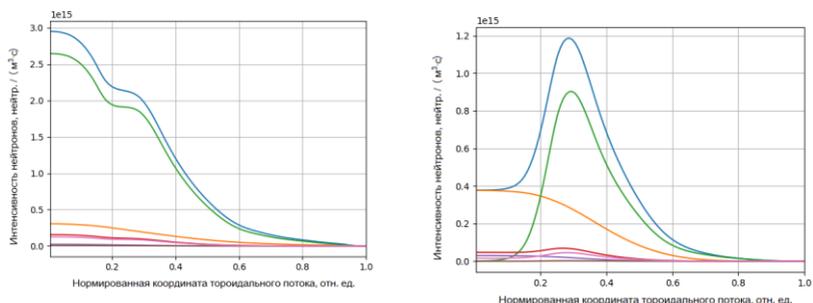
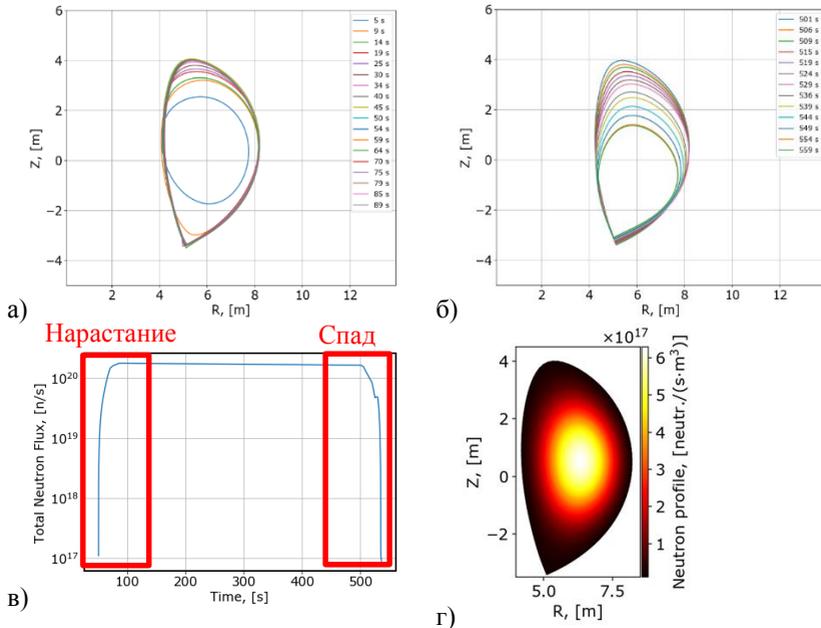


Рисунок 2 –Профиль эмиссии нейтронов DD плазмы токамака-реактора ИТЭР

Отмеченные особенности DD плазмы создают для нейтронной диагностики дополнительные трудности в получении достоверного значения измеряемой величины.

На рисунке 3 представлены характеристики базового DT сценария развития плазмы ИТЭР. Максимальная термоядерная мощность в данном сце-

нарии 500 МВт. Максимальная ионная температура – 25 кэВ. Исходя из данных, приведённых на рисунке 1, принято приближение, в рамках которого при базовом сценарии плазмы ИТЭР все нейтроны рождаются в результате DT реакций. В базовом DT сценарии выделены две области: нарастания и спада термоядерной мощности. В ходе нарастания и спада изменяется не только значение термоядерной мощности, но и геометрия и положения плазмы, профиль пикированности интенсивности нейтронов.



эволюция геометрии сепаратрисы плазмы при нарастании (а) и спаде (б), эволюция выхода нейтронов (в) и профиль нейтронов DT плазмы ИТЭР с термоядерной мощностью 500 МВт (г)

Рисунок 3 – Базовый сценарий DT плазмы ИТЭР

В разделе 1.3 описываются основы моделирования транспорта ионизирующего излучения методом Монте-Карло. Прежде чем достичь место расположения детекторов частицы, рождающиеся в результате термоядерных реакций в плазме, проходят через конструкционные материалы установки, где испытывают ядерные реакции различных типов [8]. Проходя через конструкционные материалы изменяются такие характеристики излучения, как их количество и энергия. Такие программные комплексы, как MCNP [9] и TRIPOLI [10], позволяют моделировать транспорт ионизиру-

шего излучения методом Монте-Карло в 3-х мерной геометрии с учётом состава материалов конструкционных материалов, пространственного распределения источника нейтронов. Детальное моделирование транспорта ионизирующего излучения позволяет с высокой точностью предсказать характеристики излучения в зоне расположения детекторов и ядерных реакций частиц в чувствительном материале детекторов.

В разделе 1.4 описаны методы диагностики высокотемпературной плазмы и диагностика термоядерных нейтронов. Термин «диагностика плазмы» можно определить, как совокупность методов, инструментов и экспериментальных устройств, использующихся для измерения различных характеристик плазмы. Целью диагностики плазмы является построение математических моделей плазмы, проверка существующих моделей и описание характеристик плазмы в данном эксперименте [11]. Радиометрами нейтронов (или мониторами нейтронов) называют диагностические системы, которые измеряют число нейтронов в месте расположения детекторов. Определяя поток нейтронов в зоне расположения детекторов можно восстановить значение количества нейтронов, которые были испущены источником. А для DD и DT высокотемпературной плазмы термоядерная мощность однозначно связана с величиной выхода нейтронов. На примере экспериментов с ионизационными камерами деления (ИКД) различных типов описан процесс калибровки расчётной модели, перечислены различные особенности модели, учёт которых необходим для повышения точности результатов расчёта методом Монте-Карло. Расчётная модель транспорта ионизирующего излучения необходима для корректного определения характеристик источника нейтронов на основе измерений потока нейтронов.

Вторая глава посвящена описанию процесса моделирования характеристик радиационных полей в зоне расположения детекторов нейтронов и сигналов детекторов нейтронов высокотемпературной плазмы ИТЭР. Основные результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [A1-A3, A18-A20].

В разделе 2.1 рассматриваются конструкции мониторов нейтронного потока термоядерной плазмы ИТЭР. Мониторы термоядерных нейтронов МКД, МНП и ДМНП являются основными средствами измерения термоядерной мощности и полного выхода нейтронов DD и DT плазмы токамака ИТЭР [12]. ДМНП расположен на нижней внутренней поверхности вакуумной камеры ИТЭР в трёх симметричных позициях в тороидальном направлении. Детекторы МНП расположены на внутренней поверхности вакуумной камеры за бланкетом: один блок детекторов выше и один ниже экваториального порта. В качестве детекторов нейтронов в данных мониторах применяются ИКД с различным типом и количеством урана. Комбинация различных типов ИКД позволяет обеспечить требуемый Международной

организацией ИТЭР динамический диапазон измерений термоядерной мощности и выхода нейтронов плазмы.

Раздел 2.2 посвящён моделированию характеристик радиационных полей в зоне расположения детекторов нейтронов диагностики ДМНП. Оценочно, на моделирование плотности потока нейтронов и скорости реакции деления в детекторах ДМНП для одного момента времени от объёмного источника нейтронов методом Монте-Карло требуется ~ 10 ч реального времени параллельных вычислений на 100 узлах вычислительного кластера (по 8 ядер каждый). Следовательно, для моделирования 600 с сценария с временным разрешением 1 с требуется затратить 250 дней. Значительные временные затраты обусловили разработку гибридного метода, реализованного в аналитическом приближении для базового DT сценария плазмы ИТЭР и описанного ниже.

В разделе 2.3 рассмотрено моделирование сигналов детекторов термоядерных нейтронов высокотемпературной плазмы ИТЭР.

Для данного детектора камеры деления d сигнал F_d , создаваемый источником нейтронов с пространственным профилем S , может быть выражен оператором \hat{H}_d , который может быть представлен как интеграл по пространству источника:

$$F_d = \hat{H}_d S = \int G_d S dV, \quad (2)$$

Здесь функция ядра G_d может быть выражена тем же оператором \hat{H}_d и дельта-функцией δ :

$$G_d = \hat{H}_d \delta, \quad (3)$$

где G_d -аналог функции Грина обратного оператора \hat{H}_d^{-1} :

$$\hat{H}_d^{-1} G_d = \delta \quad (4)$$

Уравнение (3) может быть решено численно с помощью функции G_d , вычисленной методами Монте-Карло.

На рисунке 4 представлены функции Грина скорости реакции деления урана детекторов для диагностик ДМНП, МНП, МКД. Величина шага интерполяционной сетки была оптимизирована с помощью экстраполяции Ричардсона. Оптимизация величины шага позволила уменьшить количество вычислений скорости реакции на детекторах мониторов в 2 раза, необходимых для построения достоверной функции Грина и вычисления правдоподобных значений сигналов детекторов мониторов нейтронов ИТЭР.

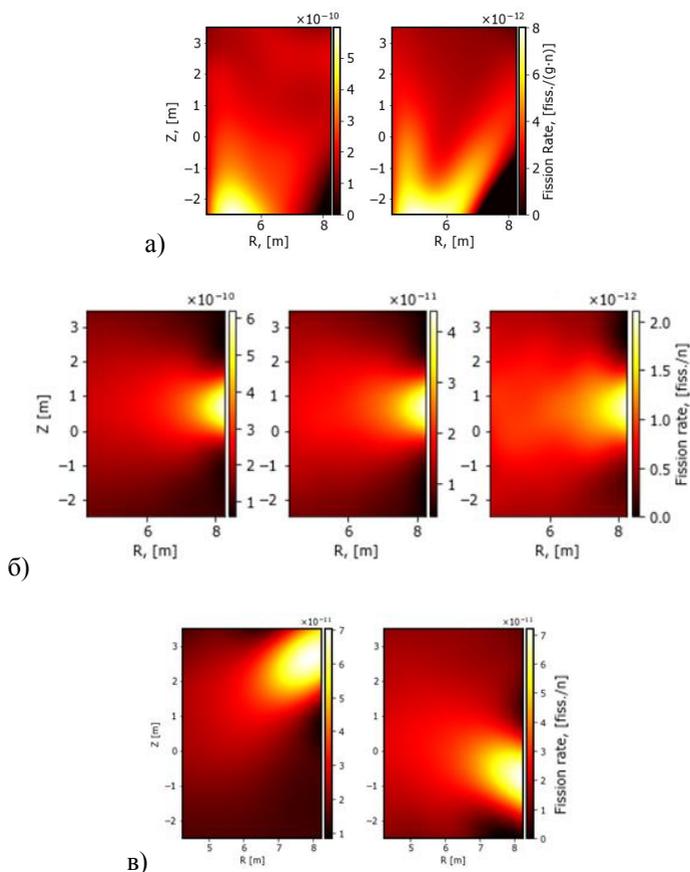


Рисунок 4 – Функция Грина скорости реакции деления урана детекторов диагностик ДМНП (а), МНП (б) и МКД (в)

Третья глава посвящена моделированию измерений диагностик нейтронов термоядерной плазмы ИТЭР. Результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [A4-A5].

В Разделе 3.1 описан процесс моделирования обработки сигналов детекторов мониторов нейтронов ИТЭР. В модели учитываются параметры источника нейтронов, конфигурация системы сбора и обработки сигналов детекторов диагностик ДМНП, МНП и МКД.

Детекторы диагностики ДМНП будут работать в счётном, флуктуационном, импульсно-флуктуационном и токовом режимах [13]. Детекторы МНП – в счётном и флуктуационном и токовом [2]. Детекторы МКД – в

счётном и флуктуационном[3]. Каждому измерительному тракту детекторов диагностик соответствует свой диапазон измерений, в котором выходной сигнал детекторов пропорционален выходу нейтронов высокотемпературной плазмы ИТЭР. Диапазоны измерения измерительных трактов имеют широкие области перекрытия, благодаря чему обеспечивается непрерывность измерений в диапазоне изменения выхода нейтронов и термоядерной мощности ИТЭР. Данная особенность измерений реализована в модели обработки сигналов.

После моделирования сигналов и статистического шума измерительных трактов диагностик через калибровочный коэффициент вычисляется значение измеряемого параметра и статистическая погрешность измерений. Измерения со всех измерительных трактов, пришедшие в систему обработки данных, усредняются с весовыми коэффициентами, значения которых обратно пропорциональны величине статистической погрешности. Данный метод усреднения позволяет в итоговой величине физического параметра источника учитывать измерения, полученные с наименьшей статистической погрешностью. На примере моделирования измерений диагностики ДМНП показано, что метод средневзвешенного лучше отражает величину статистической погрешности.

В разделе 3.2 приводится исследование зависимости результатов моделирования измерений диагностики ДМНП от различных параметров плазмы: геометрии плазмы, положения плазмы, пикированности профиля интенсивности нейтронов плазмы.

Измерения термоядерной мощности диагностикой ДМНП особенно чувствительны к вертикальному смещению плазмы, что может оказать существенное влияние на погрешность определения измеряемых параметров высокотемпературной плазмы ИТЭР. Коррекция измерений на положение центра плазмы существенно улучшит погрешность измерения параметров горения высокотемпературной плазмы ИТЭР диагностикой ДМНП.

Четвёртая глава посвящена исследованию и оптимизации погрешности определения термоядерной мощности и выхода нейтронов высокотемпературной плазмы ИТЭР мониторами нейтронного потока. Результаты, представленные в данной главе, опубликованы в работах [A18-A20].

В разделе 4.1 Стратегия калибровки мониторов нейтронного потока ИТЭР и принятые допущения.

Детекторы нейтронов будут калиброваться на измерение потоков DD и DT нейтронов с помощью нейтронного генератора типа НГ-24М [14]. После установки детекторов в ИТЭР соотношение между полным выходом термоядерных нейтронов и плотностью потоков нейтронов на детекторе будет определено экспериментально во время калибровочной компании. Ми-

шень генератора нейтронов будет размещена в нескольких заранее определенных позициях внутри вакуумной камеры: в ожидаемом центре плазмы и на периферии, чтобы охарактеризовать пространственную чувствительность детекторов, а также чувствительность к смещениям плазмы. Конечная цель калибровки - связать диагностические измерения с номинальным полным выходом нейтронов установки Y_0 , нейтр./с через номинальный калибровочный коэффициент K_{Y_0} , нейтр./отсчёт. Значение номинального калибровочного коэффициента принято равным числу нейтронов стандартного источника на один отсчёт измерительного тракта. Геометрия и профиль интенсивности нейтронов стандартного источника соответствует трёхмерной модели интенсивности нейтронов из DT плазмы ИТЭР с термоядерной мощностью 500 МВт.

Термоядерная мощность P_f , Вт DD и DT плазмы связана с полным выходом нейтронов $Y_n^{(DD \text{ или } DT)}$, н/с через теоретические коэффициенты $k^{(DD \text{ или } DT)}$, Дж/нейтр. (см. уравнение 5). Теоретический коэффициент k равен $1,17 \cdot 10^{-12}$ Дж/нейтр. для DD плазмы и $2,82 \cdot 10^{-12}$ Дж/нейтр. для DT плазмы.

Значение полного выхода DD нейтронов Y_n^{DD} в DT сценарии ИТЭР с максимальной термоядерной мощностью 500 МВт (Д:Т = 1:1) пренебрежимо мало по сравнению с величиной Y_n^{DT} . Отношение полных выходов нейтронов DD и DT Y_n^{DD}/Y_n^{DT} изменяется в диапазоне чисел от ~ 10 до 20 для сценариев DD плазмы, где ДМНП, МНП, МКД должны обеспечить измерения. Моделирование измерений параметров DD плазмы проводится в предположении, что Y_n^{DT} пренебрежимо мал по сравнению с величиной Y_n^{DD} .

Сделанные предположения описаны уравнениями 5а (DD плазма) и 5б (DT плазма), которые используются для моделирования измерений термоядерной мощности P_f , Вт с помощью радиометров термоядерных нейтронов ИТЭР.

$$P_f^{tot} = k^{DD} \cdot Y_n^{DD} + k^{DT} \cdot Y_n^{DT} \quad (5)$$

$$\tilde{P}_f^{DD}(t) = k^{DD} \cdot \tilde{Y}_n(t) = k^{DD} \cdot K_{Y_0^{DD}} \cdot C(t) \quad (5a)$$

$$\tilde{P}_f^{DT}(t) = k^{DT} \cdot \tilde{Y}_n(t) = k^{DT} \cdot K_{Y_0^{DT}} \cdot C(t) \quad (5б)$$

В разделе 4.2 представлено исследование результатов моделирования измерений термоядерной мощности и выхода нейтронов высокотемпературной плазмы ИТЭР диагностиками ДМНП, МНП, МКД в условиях DD и DT плазмы.

Результаты моделирования измерений полного выхода нейтронов Y_n и термоядерной мощности P_f радиометрами для DD плазмы показали, что величина относительной ошибки измерений не превысит $\sim 5\%$ при реконструкции значений полного выхода нейтронов и $\sim 10\%$ при реконструкции

значений термоядерной мощности. Значение относительной статистической погрешности измерений выхода нейтронов не превысит 10% при измерениях полного выхода нейтронов с помощью радиометров для DD сценариев плазмы.

Результаты моделирования измерений термоядерной мощности средствами радиометров нейтронного потока для фазы подъёма и спуска термоядерной мощности для DT сценария плазмы ИТЭР показали, что на фазе спуска DT сценария плазмы ИТЭР наблюдается монотонное возрастание систематической погрешности измерений диагностикой ДМНП. Относительная погрешность измерений термоядерной мощности радиометрами ДМНП, МНП и МКД нейтронного потока не превышает 10% с учётом величины статистической погрешности.

На стадии спуска термоядерной мощности происходит изменения положения магнитной оси плазмы – центра плазмы в RZ координатах (см. рисунок 3б). Для компенсации чувствительности измерений ДМНП к вертикальному смещению плазмы исследованы два подхода:

- 1) использование данных о положении центра плазмы для коррекции калибровочного коэффициента;
- 2) объединение показаний мониторов нейтронного потока в единый измерительный комплекс.

Ошибка измерений диагностикой МКД и МНП практически не зависит от вертикального смещения плазмы, а определяется главным образом изменением пикированности профиля эмиссии нейтронов в сравнении с номинальным источником нейтронов.

Подобрана формула коррекции калибровочного коэффициента K_{Y0} для диагностики ДМНП, благодаря которой удалось уменьшить систематическую погрешность измерений на стадии спуска термоядерной мощности плазмы с 9% до уровня 2%.

Объединение мониторов ДМНП, МНП и МКД в единую измерительную систему позволит минимизировать статистическую погрешность измерений и зависимость измерений от изменения пикированности профиля эмиссии нейтронов, однако, разнонаправленный характер поведения систематической погрешности измерений радиометрами может привести к росту систематической погрешности до уровня 5% в последние 5 секунд фазы спуска термоядерной мощности DT плазмы. Для остальной части базового сценария DT плазмы ИТЭР систематическая погрешность определения термоядерной мощности системой мониторов нейтронного потока не превышает 2%.

Величина погрешности измерений термоядерной мощности и выхода нейтронов диагностикой ДМНП, МНП и МКД, работающих независимо в условиях DD и DT плазмы ИТЭР, соответствует требованиям, предъявля-

мым Международной организацией ИТЭР, к величине погрешности измерений во всём динамическом диапазоне. Коррекция значения калибровочного коэффициента детекторов диагностики ДМНП на положение плазмы и объединение диагностик ДМНП, МНП и МКД в единый измерительный комплекс позволит уменьшить систематическую погрешность измерений термоядерной мощности и выхода нейтронов до уровня 2%.

В разделе 4.3 представлена оценка допустимой погрешности калибровки мониторов термоядерных нейтронов ИТЭР.

Одним из главных источников погрешности при измерениях параметров плазмы диагностик является погрешность калибровки детекторов систем. Учитывая стратегию калибровки, требования к погрешности измерений, результаты моделирования относительной ошибки измерений и статистической погрешности, можно оценить допустимую величину погрешности калибровки, при которой суммарная погрешность измерений не превышает требуемой величины.

Представлены результаты оценки допустимой погрешности калибровки радиометров потоков термоядерных нейтронов токамака ИТЭР. Значения погрешности калибровки посчитаны для двух конфигураций плазмы:

- 1) для номинального источника нейтронов;
- 2) для конфигурации плазмы, где сумма квадратов относительной статистической погрешности и относительной ошибки измерений максимальна – строка «наихудшая конфигурация источника» в таблице 2.

Таблица 2 – Оценка максимальной погрешности калибровки радиометров ИТЭР

Радиометр		ДМНП		МНП		МКД	
Сценарий плазмы		DD	DT	DD	DT	DD	DT
Требуемая погрешность измерений, %		20	10	20	10	20	10
Погрешность калибровки, %	Номинальный источник	18,7	9,9	17,3	9,9	17,9	9,9
	Наихудшая конфигурация источника	18,7	4,2	16,7	8,3	17,3	9,4

Оценка максимального значения погрешности калибровки, приведённая в таблице 2, может быть использована для планирования и оптимизации

калибровочной компании детекторов радиометров термоядерных нейтронов токамака ИТЭР.

В заключении приведены основные выводы диссертации.

Проведено моделирование функций Грина плотности потока нейтронов и скорости реакции деления урана детекторов диагностик ДМНП, МНП и МКД от DD и DT нейтронов плазмы ИТЭР. Точность моделирования функций Грина скорости реакции деления оптимизированы и проверены с помощью экстраполяции Ричардсона, что позволило уменьшить шаг интерполяционной сетки и увеличить скорость вычисления сигналов детекторов.

Обоснована и предложена методика моделирования сигналов детекторов нейтронов высокотемпературной плазмы с учётом изменения её параметров: геометрии и положения плазмы, пикированности профиля интенсивности термоядерных нейтронов. Данная методика позволила моделировать сигналы нейтронных диагностик в режиме реального времени.

Определена зависимость измерений диагностик ДМНП, МНП, МКД от различных параметров DD и DT плазмы ИТЭР, которая по совокупности результатов обосновала необходимость объединения радиометров нейтронного потока в единый измерительный комплекс, а для диагностики ДМНП разработку методики коррекции измерений на положение плазмы.

Исследована и оптимизирована методика определения термоядерной мощности высокотемпературной плазмы токамака-реактора ИТЭР по измерениям нейтронного потока диагностиками ДМНП, МНП, МКД с учётом позиции плазмы. Проведено моделирование измерения термоядерной мощности токамака реактора ИТЭР на примере сценариев DD и DT плазмы ИТЭР. Разработанная методика удовлетворяет предъявляемым требованиям Международной организацией ИТЭР к определению термоядерной мощности высокотемпературной плазмы.

Приведена оценка максимальной погрешности калибровки детекторов радиометров ИТЭР, которая может быть использована для планирования и оптимизации калибровочной компании детекторов радиометров термоядерных нейтронов токамака ИТЭР.

Публикации автора по теме диссертации в журналах

- A1. Fast simulation of local radiation fields for synthetic diagnostics / A.R. Polevoi, **A.O. Kovalev**, R.N. Rodionov, et al. // Proc. of the 45th EPS Conference on Plasma Physics. – 2018. – P4.1009 – pp. 997-1000 (**Scopus**).
- A2. Оценка влияния динамики параметров плазмы ИТЭР на показания радиометра нейтронного потока / **A.O. Ковалев**, Д.В. Портнов, Ю.А. Кашук // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2019. – т. 42, вып. 3. – с. 64-73 (**BAK**).
- A3. Activation of ITER Divertor Neutron Flux Monitor / D.A. Kumpilov, R.N. Rodionov, **A.O. Kovalev**, et al. // Journal of Instrumentation. – 2019. – Vol. 14, Issue 11. – C11019 (**Scopus**).
- A4. Simulations of Fusion Power Measurements by Monitors of Neutron Flux in Evolving ITER Plasma / **A.O. Kovalev**, A.R. Polevoi, E.I. Polunovskiy, et al. // Journal of Fusion Energy. – 2020. – Vol. 39, Issue 1-2. – pp. 40-52 (**Web of Science**).
- A5. Анализ радиационных условий работы диагностики ДМНП ИТЭР / **A.O. Ковалев**, Р.Н. Родионов, Д.В. Портнов, и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2021. – т. 44, вып. 1. – с. 18-26 (**BAK**).

Публикации автора по теме диссертации в тезисах конференций

- A6. ITER neutron flux monitors benchmark study with NG-24M neutron generator / D.V. Portnov, A.V. Batyunin, **A.O. Kovalev**, et al. // XI ITER Neutronics meeting, Karlsruhe, Germany 23-28 May 2016;
- A7. Divertor Neutron Flux Monitor Synthetic Diagnostic Modeling for Plasma Control System Feedback Loop / **A.O. Kovalev**, L. Bertalot, A.R. Polevoi et al. // 30th Meeting of the ITPA Topical Group on Diagnostics, 21st-24th June 2016, Budker Institute of Nuclear Physics, Russian Federation;
- A8. Оценка качества численных моделей в экспериментах с генератором нейтронов НГ-24М / Д.В. Портнов, Ю.А. Кашук, С.Ю. Обудовский и др. // Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2016), г. Обнинск, Россия, 23.11 –25.11.2016;
- A9. Моделирование сигнала диверторного монитора нейтронного потока для системы управления плазмы токамака ИТЭР / **A.O. Ковалев**, Д.В. Портнов, Ю.А. Кашук // Современные средства диагностики плазмы и их применение, 14 ноября 2016, НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия;
- A10. Моделирование сигнала диверторного монитора нейтронного потока для системы управления плазмы токамака ИТЭР / **A.O. Ковалев**, Д.В. Портнов, Ю.А. Кашук // 59-ая научная конференция МФТИ,

- Частного учреждения «ИТЭР-Центр», г. Москва, Россия, 23 Ноября 2016;
- A11. Моделирование системы измерения диагностики ДМНП в составе интегрированного комплекса моделирования ИТЭР / **А.О. Ковалев**, Д.В. Портнов, Ю.А. Кашук // XVII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», 13-17 июня 2017г., г. Звенигород, Россия;
- A12. Моделирование транспорта нейтронов в программном комплексе TRIPOLI в условиях эксперимента с источниками DD и DT нейтронов / И.Н. Накипов, **А.О. Ковалев**, Ю.А. Кашук и др. // XVII Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы», 13-17 июня 2017г., г. Звенигород, Россия;
- A13. Синтетическая диагностика диверторного монитора нейтронного потока токамака-реактора ИТЭР / **А.О. Ковалев**, Д.В. Портнов, Ю.А. Кашук, А.Р. Полевой // XLIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 13 – 17 февраля 2017 г., г. Звенигород, Россия;
- A14. Моделирование сигналов диагностики ИТЭР «Диверторный монитор нейтронного потока» для системы управления плазмы токамака-реактора / **А.О. Ковалев**, Д.В. Портнов, Ю.А. Кашук, А.Р. Полевой // Конференция молодых специалистов «Инновации в атомной энергетике», в АО «Ордена Ленина Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники имени Н.А. Доллежалея», г. Москва, Россия, 23 – 24 мая 2017 г.;
- A15. Оптимизация синтетической модели диагностики «Диверторный монитор нейтронного потока» токамака-реактора ИТЭР / **А.О. Ковалев**, Д.В. Портнов, Ю.А. Кашук // XLV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, Россия, 2 – 6 апреля 2018 г.;
- A16. Fast Simulation of Local Radiation Fields for Synthetic Diagnostics / A.R. Polevoi, **A.O. Kovalev**, R.N. Rodionov, et al. // EPS 2018. Prague, Czech Republic, 2-6 July 2018;
- A17. Измерение полного выхода нейтронов токамака-реактора ИТЭР диагностикой ДМНП и ВНК / **А.О. Ковалев**, Р.Н. Родионов, Д.В. Портнов // XLVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, Россия, 16 – 20 марта 2020 г.;
- A18. Accuracy of Total neutron flux measurements by neutron flux monitors on ITER / **A.O. Kovalev**, R.N. Rodionov, D.V. Portnov // 23rd Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics, on-line, 2021;
- A19. Об измерении термоядерной мощности системой мониторов нейтронного потока токамака-реактора ИТЭР / **А.О. Ковалев**,

Р.Н. Родионов, Д.В. Портнов, Ю.А. Кашук // XIX Конференция по диагностике высокотемпературной плазмы, 27 сентября – 01 октября 2021 г., г. Сочи, Россия.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, полученные автором по теме диссертации

A20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682212 «GFRF-NF». Правообладатель: Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» (RU). Авторы: Кашук Юрий Анатольевич (RU), **Ковалев Андрей Олегович** (RU), Портнов Дмитрий Владиславович (RU). Заявка №2022667017. Дата поступления: 13.09.2022. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21.11.2022.

A21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683197 «Программа для ЭВМ «DAS-FC». Правообладатель: Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» (RU). Авторы: Кашук Юрий Анатольевич (RU), Воробьев Вячеслав Анатольевич (RU), **Ковалев Андрей Олегович** (RU), Портнов Дмитрий Владиславович (RU). Заявка №2022666821. Дата поступления: 13.09.2022. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 01.12.2022.

Список литературы

1. Kaschuck Yu.A. et al. – Divertor neutron flux monitor: conceptual design and calibration. — AIP Conf. Proc., 2008, vol. 988, p. 303.
2. Yang J. et al. Fusion Neutron Flux Monitor for ITER — Plasma Science and Technology, 10, 141 (2008).
3. Nishitani T. et al. – In-Vessel Neutron Monitor Using Micro Fission Chambers for ITER. — In: Stott, P.E., Gorini, G., Prandoni, P., Sindoni, E. (eds) Diagnostics for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors 2. Springer, Boston, MA, (1998). https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5353-3_60
4. Putvinskii S.V. – Alpha particles in a tokamak. — In Reviews of Plasma Physics, vol. 18 (KADOMTSEV, B.B., Ed.), Consultants Bureau, New York (1993) 239.
5. H.-S. Bosch, G.M. Hale – Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities — Nuclear Fusion, 10/2002.
6. Polevoi A.R. et al. – Assessment of neutron emission from DD to DT operation of ITER. — In: P4.126, 42th EPS Conference on Plasma Physics. Lisbon, Portugal, 22—26 June 2015; <http://ocs.ciemat.es/EPS2015PAP/pdf/P4.126.pdf>.

7. Imbeaux F. et al. – Design and first applications of the ITER integrated modelling & analysis suite —Nucl. Fusion 55 123006, 2015.
8. Крючков Э.Ф., Юрова Л.Н. – Теория переноса нейтронов: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2007. – 272 с.
9. X-5 Monte Carlo Team, MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I, MCNP Overview and Theory, Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
10. E. Brun – Tripoli-4®, CEA, EDF and AREVA reference Monte Carlo code, Annals of Nuclear Energy, 10.2013, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.053>
11. Луизова Л.А. – Оптические методы диагностики низкотемпературной плазмы: Учебное пособие – ПетрГУ, 2001.
12. Krasilnikov A.V. et al. – Status of ITER neutron diagnostic development. — Nucl. Fusion, 2005, vol. 45 p. 1503; <https://doi.org/10.1088/0029-5515/45/12/005>.
13. Martazov E.S. et al. Data Acquisition System Prototype of the ITER Diagnostic Divertor Neutron Flux Monitor Testing at Research Nuclear Facilities — EPJ Web Conf., 253 (2021) 03003, DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202125303003>.
14. Сыромуков С.В. и др. Генератор нейтронов НГ-24 для ядерной медицины и термоядерных исследований. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 1.