

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Афанасенко Роман Станиславович

НЕЙТРОНИКА ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, КОНСТРУКЦИЙ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТОКАМАКА ИТЭР

Специальность 1.3.9 – Физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении - «Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»

Научный руководитель: **Кутеев Борис Васильевич**
доктор физико-математических наук, заместитель
руководителя отделения токамаков НИЦ «Курчатовский
институт», профессор НИЯУ МИФИ, г. Москва

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
Романников Александр Николаевич
доктор физико-математических наук, акционерное
общество «Государственный научный центр Российской
Федерации Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований», научный руководитель по
управляемому термоядерному синтезу и плазменным
технологиям
Лебедев Сергей Владимирович доктор физико-
математических наук, главный научный сотрудник,
Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Российской академии наук, г. Санкт-Петербург

Защита состоится « 29 » марта 2023 г. в 15.00 часов, 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 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.1.01
кандидат физико-технических наук



Степаненко А.А.

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена численному моделированию радиационных воздействий плазмы токамака ИТЭР на материалы и конструкции диагностических систем, необходимому на текущей стадии проектирования и сооружения установки.

Актуальность темы исследования

Развитие физически обоснованных электронных моделей конструкций и методов моделирования нейтронных процессов в термоядерных реакторах продолжает оставаться в числе наиболее актуальных задач на современном этапе решения проблемы УТС.

Актуальность решения задач моделирования переноса нейтронов и гамма-квантов в термоядерной установке с дейтерий-тритиевой плазмой, генерирующей высокоэнергичные частицы и излучения, включая нейтроны и гамма - кванты, определяется:

- 1) Необходимостью разработки диагностических систем для токамаков, выдерживающих высокие нейтронные потоки термоядерной DT и DD плазмы.
- 2) Потребностями в совершенствовании современных методов численного моделирования, используемых для исследования термоядерной плазмы, как источника нейтронов и вторичных гамма-квантов в планируемых условиях работы токамака ИТЭР [1].
- 3) Важностью уточнения нейтронных эффектов при создании нового источника энергии в виде термоядерной плазмы при проектировании гамма-нейтронной защиты материалов и конструкций.
- 4) Высоким уровнем заинтересованности проекта ИТЭР в скорейшем создании современных диагностических систем, включая поставляемую РФ систему диагностики плазмы «Спектроскопия Водородных Линий и Примесей» (СВЛ) [2].

Цели и задачи

Целью диссертационной работы является развитие и применение новых подходов, использующих метод Монте-Карло при интегрированном моделировании нейтронно-физических процессов в DT и DD плазме термоядерных установок и позволяющих определять радиационные нагрузки, которые формируются за время жизненного цикла диагностических систем в различных режимах работы токамака ИТЭР.

Поставленная цель достигнута путем решения следующих задач:

- 1) Разработать алгоритмы расчета и реализовать новые программные средства, решая актуальные инженерно-физические задачи термоядерного синтеза и с их помощью спрогнозировать гамма-нейтронные параметры плазмы и эволюцию радиационных свойств технологических систем установок типа токамак на основе метода Монте-Карло.
- 2) Создать высоко детализированные электронные макеты диагностики плазмы «Спектроскопия Водородных Линий и Примесей» (СВЛ) и компонентов токамака ИТЭР, способные обеспечить проведение расчетов со статистической

- погрешностью результатов менее 10 %.
- 3) Исследовать влияние источника термоядерных DT и DD нейтронов из плазмы на различные конструкционные материалы установки ИТЭР.
 - 4) Использовать полученные результаты моделирования радиационных нагрузок и эволюции свойств материалов для создания диагностической системы СВЛ токамака ИТЭР.

Научная новизна

Впервые создана детализированная электронная модель термоядерной установки ИТЭР, обеспечившая нейтронно-физический анализ процессов взаимодействия плазмы с конструкциями и материалами диагностических систем, включая СВЛ.

В состав электронной модели системы включены: плазма, как первичный источник термоядерных нейтронов с характеристиками базового режима работы токамака на мощности 500 МВт [3], внутрикамерные и внутрипортовые элементы сектора токамака размером 1/9 установки, включая детальную конструкцию СВЛ диагностики в экваториальных портах № 11,12. Модель учитывает детальную конструкцию диагностической первой стенки (ДПС), включающую форму оптических вырезов в конструкционных и функциональных материалах, обеспечивающих транспортировку светового луча. Использование детальной модели плазмы и внутривакуумной части диагностики СВЛ, позволило выполнить моделирование взаимодействия высокоэнергичных частиц, испускаемых DT и DD плазмой, с материалами конструкций ИТЭР в реальной трехмерной геометрии, и путем оценки нейтронных и гамма потоков, дало возможность обосновать и выбрать размещение конструкционных элементов, определить оптимальные материалы, выявить критические радиационные нагрузки.

Разработанная нейтронно-физическая модель жизненного цикла СВЛ диагностики впервые позволила получить картину нейтронных и гамма-полей, радиационных повреждений материалов и конструкций в области Узла Входных Зеркал (УВЗ) с разрешением, существенно превышающим достигнутое в аналогичных работах по проектированию ИТЭР [4].

Впервые с использованием созданной модели сектора токамака ИТЭР, определены:

- условия работы СВЛ диагностики в течение всего жизненного цикла ИТЭР и показано, что они являются допустимыми для предложенной конструкции защиты и теплоотвода, что важно для создания поставочного варианта диагностической системы;
- перспективная компоновка нейтронной и гамма защиты диагностических модулей в экваториальных портах вакуумной камеры, а также оптимальные материалы конструкций СВЛ диагностики;
- места локальных максимумов радиационных нагрузок и их градиенты в области системы СВЛ и ее окружения;
- температурные поля, на основе которых оказалось возможным выбрать наиболее простую и надежную конструкцию СВЛ диагностики с охлаждением за счет переизлучения потоков тепла из плазмы на охлаждаемые водой стенки порта.

Теоретическая и практическая значимость

Создание детализированных моделей сектора термоядерной установки ИТЭР с учетом формы плазмы, генерируемых потоков нейтронов и гамма-квантов, режимов горения термоядерной плазмы, а также формы и состава конструкционных и функциональных материалов позволило более точно определить радиационные нагрузки на компоненты не только для диагностического оборудования, но и всего порта вакуумного корпуса ИТЭР, позволило спроектировать общую планировку порта, выбрать наиболее эффективные материалы и радиационную защиту.

Разработанные новые методы расчета дали надежную оценку условий теплообмена с участием нейтронов и гамма-квантов, а также обосновали возможность радиационного охлаждения элементов диагностики СВЛ.

Полученные результаты использованы при проектировании, подготовке и проведении испытаний макетов компонент диагностики СВЛ и будут учтены при создании Российской Федерацией поставочного варианта диагностики для ИТЭР.

Положения, выносимые на защиту

- 1) Оригинальная методология компьютерного моделирования процессов с участием нейтронов плазмы, базирующаяся на глобальной модели термоядерного реактора ИТЭР и использующая высоко детализированные модели конструкций токамака для определения жизненного цикла материалов и компонентов.
- 2) Обоснование на основе электронных моделей технических решений по оптимальному взаимному расположению систем диагностики плазмы в патрубках токамака ИТЭР и эффективному использованию радиационной защиты от нейтронов и гамма-квантов.
- 3) Важные для оценки работоспособности диагностических систем ИТЭР результаты моделирования: нейтронный и гамма потоки термоядерной DT и DD плазмы, радиационные повреждения (смещений на атом - сна), энерговыделение, температурные поля.
- 4) Выбор перспективных конфигураций диагностических систем в портах ИТЭР и прогнозы изменения характеристик разрабатываемых конструкций и свойств материалов в течение жизненного цикла работы установки в базовых плазменных режимах.

Степень достоверности результатов

Полученные в ходе работы результаты основываются на использовании положений и законов физики плазмы и ядерной физики, многократно проверенных методов численного моделирования процессов взаимодействия термоядерной плазмы с материалами и элементами конструкции токамаков. Проведенный анализ аналогичных работ [5, 6] и проверка на их основе использованных численных методов позволяют сделать вывод, что развитые модели и полученные научные результаты работы достоверны и согласуются с известными теоретическими, расчетными и экспериментальными данными в аналогичных условиях использования.

Личный вклад автора

Вынесенные на защиту положения отражают личный вклад автора в выполненные работы:

- созданы детализированные трехмерные нейтронно-физические электронные макеты диагностических систем ИТЭР и их ближайшее окружение, оценены характеристики взаимодействия термоядерной плазмы с диагностическим оборудованием токамака;
- нейтронно-физический анализ и компьютерное моделирование были проведены лично автором, им осуществлялась обработка и анализ полученных результатов, автор принимал также активное участие в разработке и оптимизации рабочих характеристик диагностической системы ИТЭР.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах НИЦ «Курчатовский институт». Материалы диссертации были представлены на следующих конференциях:

- 59-ая научная конференция МФТИ, Москва, 2016.
- Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз, Москва, НИЯУ МИФИ (2017, 2022).
- Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (2017, 2018).
- Всероссийская конференция по диагностике высокотемпературной плазмы (2017, 2021).
- Международная научно-техническая конференция, Москва, НИКИЭТ, 2018.
- Современные средства диагностики плазмы, Москва, НИЯУ МИФИ, 2018.
- Symposium on Fusion Technology (SOFT), 20-25 September 2020.

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

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК. Четыре статьи проиндексированы в базе данных Scopus.

- 1) К.Ю. Вуколов, Е.Н. Андреевко, Р.С. Афанасенко, А.А. Борисов, А.А. Морозов. Особенности применения волоконной оптики в ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2017. – Т. 3. Вып.3.
K. Yu. Vukolov, E. N. Andreenko, R. S. Afanasenko, A. A. Borisov, A. A. Morozov. Specific Features of Fiber Optics Application in ITER // Physics of Atomic Nuclei. – 2018 (перевод).
- 2) Р.С. Афанасенко, А.Г. Алексеев, Б.В. Кутеев, А.А. Морозов, Д.К. Вуколов. Радиационные нагрузки на узел входного зеркала диагностики СВЛ в экваториальном порту ИТЭР № 12 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2020. –

Т. 43. Вып. 1.

- 3) Р.С. Афанасенко, А.Г. Алексеев, Б.В. Кутеев, А.А. Морозов, Д.К. Вуколов, А.М. Козлов. Тепловые нагрузки на узел входного зеркала диагностики СВЛ в экваториальном порту ИТЭР № 12 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2020. – Т. 43. Вып.3.
- 4) Р.С. Афанасенко, К.Ю. Вуколов, А.А. Морозов, Д.К. Вуколов. Роль нейтронных расчетов в разработке оптических диагностик ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 45, вып. 2.
R. S. Afanasenko, K. Yu. Vukolov, D. K. Vukolov, and A. A. Morozov, Role of the Neutron Calculations in the Development of Optical Diagnostics in ITER // ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei, 2022, Vol. 85, No. 7, pp. 1–17 (перевод).

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, три главы, заключение и список литературы. Объем научной работы составляет 134 страниц. В работу включены 47 рисунков и 26 таблиц. Список использованной литературы включает в себя 95 источников.

Содержание работы

Во Введении описывается современное состояние проблемы УТС, методы нейтронно-физического анализа процессов переноса нейтронов и гамма-излучения в термоядерных установках, обосновывается актуальность данной диссертационной работы. Сформулирована цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 описана методика расчетов нейтронно-физических характеристик в трехмерных системах с использованием метода Монте-Карло [7], в общем виде описана схема определения нейтронных и гамма- потоков в плазме и создаваемых ими радиационных повреждений в элементах конструкции токамака. Приведено описание универсального транспортного кода MCNP [8], используемого для оценки гамма-нейтронных характеристик и расчета энерговыделения в ключевых элементах установки.

Глава содержит обзор и анализ литературы, посвященной управляемому термоядерному синтезу, и диагностическому оборудованию, используемому в токамаке ИТЭР. На их основе были сформулированы требования, предъявляемые к расчету радиационных полей в плазме токамака, зоне экваториальных портов вакуумного корпуса ИТЭР, а также в местах размещения внутрикамерных элементов СВЛ-диагностики. Также, в обзоре проанализированы экспериментальные и теоретические исследования плазмы токамака, как источника ионизирующих излучений [9].

Диагностика плазмы основана на анализе формируемых плазмой электрических и магнитных полей, излучений (от микроволнового до гамма-диапазона), покидающих плазму частиц. Характеристики взаимодействия плазмы с зондами и ее реакции на внешние воздействия электрических и магнитных полей, излучений, атомарных и ионных пучков, макрочастиц также широко используются в диагностических целях.

Высокотемпературную плазму ИТЭР, в объеме которой в результате реакций DT и DD синтеза выделяются нейтроны, можно представить, как источник нейтронов. Во время импульса горения термоядерной DT плазмы изменяются как форма источника, так и распределение нейтронов в полоидальном сечении [10]. Отмеченные факторы необходимо учитывать при составлении алгоритмов пересчёта плотности потока нейтронов в физические параметры плазмы и оценке нейтронных нагрузок на внутрикамерные конструкции.

Основным источником высокоэнергичных нейтронов является плазма, которая во время работы ИТЭР на мощности 500 МВт будет излучать нейтроны с интенсивностью $\sim 1,8 \cdot 10^{20} \text{ с}^{-1}$. На Рисунке 1 представлено распределение интенсивности источника 14 МэВ нейтронов по малому радиусу токамака ИТЭР.

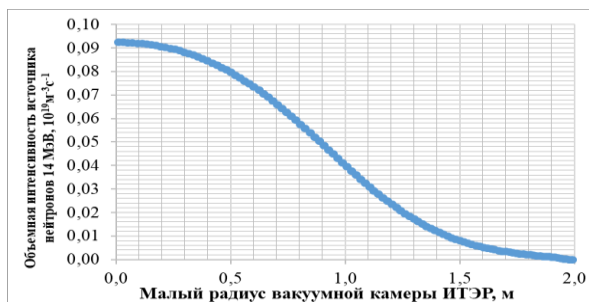


Рисунок 1. Распределение объемной интенсивности источника термоядерных нейтронов по малому радиусу вакуумной камеры ИТЭР

На Рисунке 2 представлено вертикальное сечение установки и пространственное распределение первичного источника термоядерных нейтронов, формируемого плазмой ИТЭР. «Первичный источник» нейтронов с энергией 14 МэВ и мощностью термоядерной DT плазмы 500 МВт, формирующий потоки и спектр рассеянных нейтронов, моделируется без учета внешнего окружающего пространства.

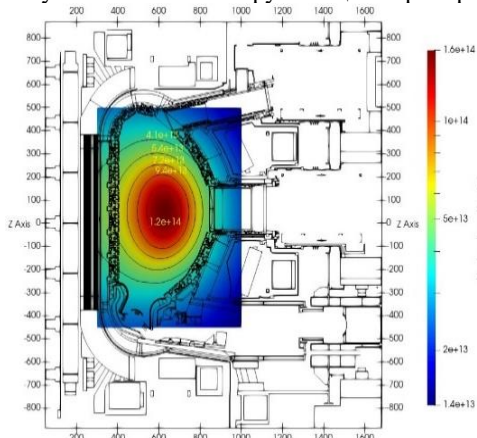


Рисунок 2. Полный по энергии поток нейтронов «первичного источника» в ИТЭР, $\text{н/см}^2 \cdot \text{с}$

Нейтроны могут покинуть вакуумную камеру сквозь радиационную защиту и технологические зазоры в токамаке, порождая при захвате материалами конструкций поток быстрых гамма-квантов. На Рисунке 3 представлен профиль нейтронного источника - вертикальное и горизонтальное распределения плотности полного потока по энергии нейтронов в плазменной камере и за её пределами во время работы термоядерного реактора ИТЭР, полученные с помощью математического моделирования плазменного режима для базового сценария ИТЭР с учетом рассеянных и замедленных нейтронов. Базовый режим характеризуется высоким удержанием плазмы, током плазмы 15 МА, электронной температурой 25 кэВ и термоядерной DT мощностью 500 МВт.

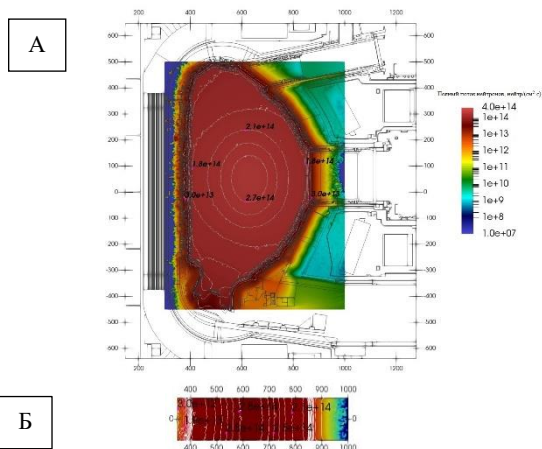


Рисунок 3. Полный по энергии поток нейтронов для базового сценария, излучаемые DT плазмой ИТЭР, вертикальное (А) и горизонтальное сечение (Б), $\text{н/см}^2\cdot\text{с}$

Как видно из Рисунка 3, максимальные значения плотности потока нейтронов формируются вблизи центральной магнитной оси токамака, достигая значения $2,7 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2\cdot\text{с}$. Размещение диагностической системы СВЛ планируется в экваториальном порту, на границе которого плотность потока нейтронов составляет $1,8 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2\cdot\text{с}$. Нейтронный поток несет в себе термоядерные 14 МэВ нейтроны из первичного источника излучения и рассеянный поток – нейтроны, потерявшие часть первоначальной энергии после одного или нескольких столкновений с окружающей средой установки (ДПС, вакуумная камера, бланкетные модули, диагностические системы и тд.). Разница «полного» от «первичного» потока из плазмы может достигать вплоть до 2-3х раз, что является весьма существенным фактором при оценке нейтронных нагрузок.

В процессе развития плазменного шнура изменяются как форма источника (вытянутость, треугольность), так и распределение нейтронов источника в полоидальном сечении, что необходимо учитывать при составлении алгоритмов пересчёта плотности потока нейтронов в физические параметры плазмы.

В настоящее время алгоритмы определения сдвига магнитных поверхностей

плазмы для оценок МГД возмущений или моделирование стационарных режимов работы установки хорошо отработаны и доведены до уровня стандартных кодов. В свою очередь, численное решение уравнения Грэда - Шафранова [11] и определение изменения положения плазменного шнура для ИТЭР не являются ключевыми задачами для нейтроники и практически нигде не представлены в литературе [3]. Аналогичная ситуация связана и с источником нейтронного излучения в плазме, практически никто не занимался изменением положения нейтронного источника в ИТЭР, для оценки как радиационных повреждений, так и воздействий на нейтронные показатели при смещении плазмы.

В работе был оценен Шафрановский сдвиг $\Delta \sim 0,32$ м, при $\beta = 1$ (см. Глава 2). На основе полученных данных, исследовалось воздействие смещения максимума «первичного» нейтронного источника на длину Шафрановского сдвига в сторону внешней стенки вакуумной камеры и оценены соответствующие радиационные нагрузки на элементы диагностических систем [12].

Моделирование нейтронно-физических характеристик проводилось с использованием C-Model [13] — это последняя версия модели сектора токамака, разработанной Международной Организацией ИТЭР для нейтронно-физического анализа с помощью кода MCNP. Модель описывает геометрию и материальный состав токамака, начиная от плазмы, как источника термоядерных нейтронов, защитных и испытательных модулей бланкета, ДПС вплоть до поверхности биологической защиты, обращенной к галерее в здании комплекса токамака.

Модель включает в себя один 40° сектор вакуумной камеры вместе со всеми компонентами. Перенос частиц в пространстве, примыкающем к модельному сектору, определяется выбором граничных условий (зеркальное отражение и периодическое продолжение) в боковых плоскостях, ограничивающих 40° - тороидальный сектор модели.

Одной из основных функций диагностической системой СВЛ, является измерение изотопного состава плазмы, то есть отношения плотности водорода, дейтерия и трития ($n_H/n_D/n_T$) на периферии плазменного шнура ($r > 0,85$). Для центральной области плазмы эту функцию будет выполнять диагностика NPA (Neutral Particles Analyzer – Анализатор Нейтральных Атомов) [14], расположенная по соседству в Экваториальном порту №11. Для получения данных об изотопном составе плазмы средствами СВЛ диагностики необходимо провести измерения формы спектра одной из бальмеровских линий.

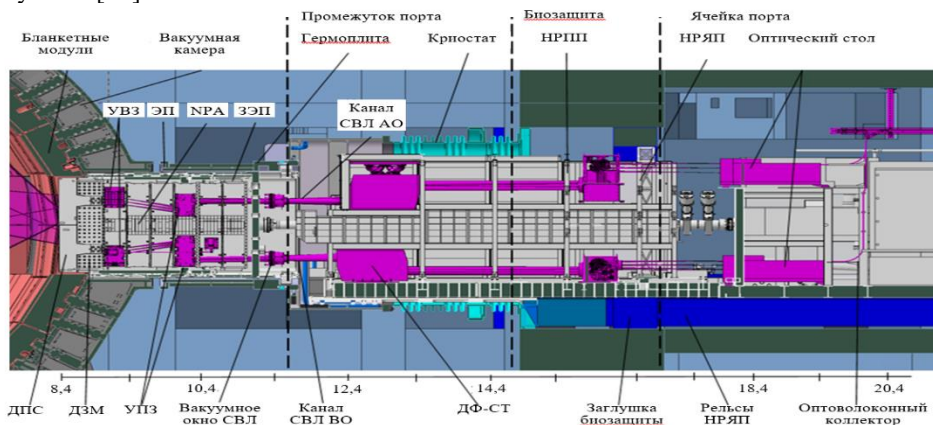
Диагностикам СВЛ и NPA, расположенным во втором Диагностическом Защитном Модуле (ДЗМ#2) ЭП11, для корректной работы и из-за технических особенностей требуется прямой обзор на плазму. Поэтому их оптические пути срезают большое количество защитного материала в ДЗМ, предназначенного для ослабления гамма - нейтронного излучения. При таком неблагоприятном расположении двух диагностических систем необходимо досконально изучить распределение радиационных потоков в порту, а также максимально рационально расположить данные системы, с используемым защитным материалом ЭП, так как существуют эксплуатационные ограничения, связанные с массой порта (полная масса ЭП не должна превышать 50 тонн).

В ходе работы исследовалось влияние положения УВЗ диагностики СВЛ (см.

Рисунок 4) на полный по энергии поток нейтронов в зоне герметизирующей плиты, отделяющей внутривакуумное пространство порта от межпортового пространства, а также оценивались радиационные повреждения материалов диагностической системы, путем определения количества смещений атомов кристаллической решетки из первоначальных равновесных положений за все время облучения (в единицах сна).

В экваториальном порту модели С-Model реактора ИТЭР размещалась диагностическая сборка с тремя ДЗМ, которые выполняют функцию ее защиты. Расчет проводился с помощью кода MCNP и ядерными константами FENDL 3.1 [15], с источником 14-МэВ нейтронов.

В исходной модели токамака описана конструкция экваториальных портов вакуумного корпуса ИТЭР (ЭП11, ЭП12), куда интегрировались модели Российской диагностической системы СВЛ. Общий вид сечения экваториального порта показан на Рисунке 4 [16].



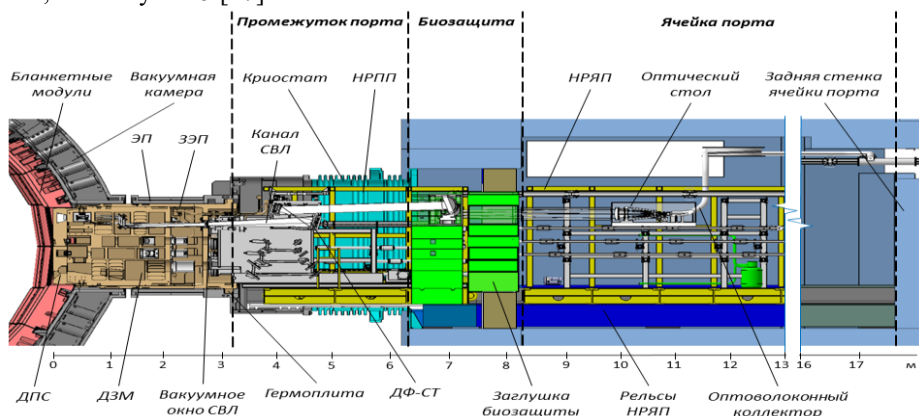
Два канала СВЛ-диагностики А0 и В0 и NRA-труба в ДЗМ #2 ЭП11 (блоки защитны не показаны): линейка указывает расстояние от оси тора в метрах; ЭП – экваториальный порт; UV3 – узел входных зеркал; UPZ – узел промежуточных зеркал (зеркала М3, М4); ЗЭП – заглушка экваториального порта, НРПП – несущая рама в промежутке порта, НРЯП – несущая рама в ячейке порта, ДФ-СТ – длиннофокусный спектральный телескоп

Рисунок 4. Концептуальный вид диагностической сборки в экваториальном порту №11 установки ИТЭР, вертикальное сечение

В экваториальном порту №12 – СВЛ диагностика представлена одним каналом, конус наблюдения которого направлен на середину blankets, отсюда и название – ЭП12 Middle View (MV). Конус наблюдения образует большой вырез защитного материала в ДПС, через который высокоэнергетические нейтроны, могут беспрепятственно проникать вплоть до оптических зеркал диагностики.

В расчетных моделях ЭП12 весь экваториальный порт, за исключением пространства размещения СВЛ-диагностики, заполнен гомогенной смесью стали SS316L(N) – IG, карбида бора, воды и пустоты. Детализированная модель оптических компонентов диагностики (UV3, Узел Передаточных Зеркал (UPZ), привод защитной

шторки и вакуумное окно) СВЛ диагностики учитывает вырезы в защитном материале, предназначенные для транспортировки светового луча от ДПС до герметизирующей плиты, см. Рисунок 5 [17].



ДЗМ – диагностический защитный модуль, ДПС – диагностическая первая стенка, ЭП – экваториальный порт, ЗЭП – заглушка экваториального порта, НРПП – несущая рама в промежутке порта, НРЯП – несущая рама в ячейке порта, ДФ-СТ – длиннофокусный спектральный телескоп

Рисунок 5. Размещение СВЛ диагностики в экваториальном порту №12 установки ИТЭР (вертикальное сечение)

Общая схема работы СВЛ диагностики (см. Рисунок 4 и 5) заключается в сборе излучения из плазмы, попадающего на сферическое зеркало М1, которое направляет его на плоское зеркало М2, смещенное в горизонтальной плоскости. От него световой поток идет на зеркала М3 и М4, расположенные в задней части корпуса ДЗМ на разной высоте в общей вертикальной плоскости. Зеркала М3 и М4 образуют собой - УПЗ. Принятое размещение зеркал (оптический лабиринт) позволяет передавать световой сигнал от плазмы вглубь ДЗМ, при этом, не давая прямого пролета высокоэнергичным нейтронам. Данное расположение элементов конструкции диагностики позволяет существенно снизить нейтронный поток как на отдельные элементы диагностики, так и на общую радиационную обстановку за герметизирующей плитой.

Краткие выводы к Главе №1.

Для решения актуальных задач в области моделирования и проектирования диагностического оборудования термоядерных установок, была изучена и усовершенствована методология оценки радиационных нагрузок при использовании совершенно нового источника ионизирующего излучения – термоядерной плазмы реакторных параметров.

1. Представлен обзор литературы по вопросам термоядерной плазмы и описание проектируемого Российского диагностического оборудования по спектроскопии водородных линий и примесей токамака ИТЭР.
2. Сформирован первичный нейтронный источник для ДТ плазмы для номинальной

термоядерной мощности ИТЭР в 500 МВт и проведено его сравнение с вторичным источником нейтронов в стационарном режиме работы установки. Вторичный источник формируется нейтронами, отраженными от элементов конструкции установки, за счет замедления и $(n, 2n)$ реакций на бериллии и других элементах конструкции, что вносит существенный (до 2-3 раз) вклад в радиационные нагрузки на материалы.

3. На основе оценки Шафрановского сдвига центра термоядерной плазмы в ИТЭР, произведена корректировка параметров первичного нейтронного источника и сформирован новый, который использован для оценки изменения радиационных характеристик на диагностическое оборудование при смещении центра плазмы наружу от геометрического центра вакуумной камеры.

Глава 2 посвящена анализу гамма-нейтронных полей, нагрузок и повреждений материалов в разрабатываемых конструкциях диагностического оборудования токамака ИТЭР.

В работе проводилось определение радиационных нагрузок на элементы диагностического оборудования, расположенного в экваториальных портах установки ИТЭР и оценке вклада от этих систем в нейтронный поток на границе вакуумной области. Определение плотности потока нейтронов за герметизирующей плитой характеризует качество защитных свойств конструкции диагностических модулей. На основе полученных результатов моделирования, производилась оптимизация нейтронной защиты портовой заглушки за счет изменения положения диагностических систем (уменьшения или увеличения вырезов для систем, их взаимного расположения и оценки парциального вклада) и добавления защитного материала в наиболее проблемные области.

Для определения гамма-нейтронных нагрузок в базовой расчетной модели на диагностические системы СВЛ и NPA в ЭП11 и их вклада в плотность потока нейтронов за герметизирующей плитой были разработаны несколько вариантов, в которых изменялось положение нижнего УВЗ диагностики СВЛ и вольфрамового коллиматора NPA диагностики. На Рисунке 6 представлено вертикальное сечение расчетной модели ЭП11 в зоне ДЗМ#2 с взаимным расположением диагностик СВЛ и NPA.

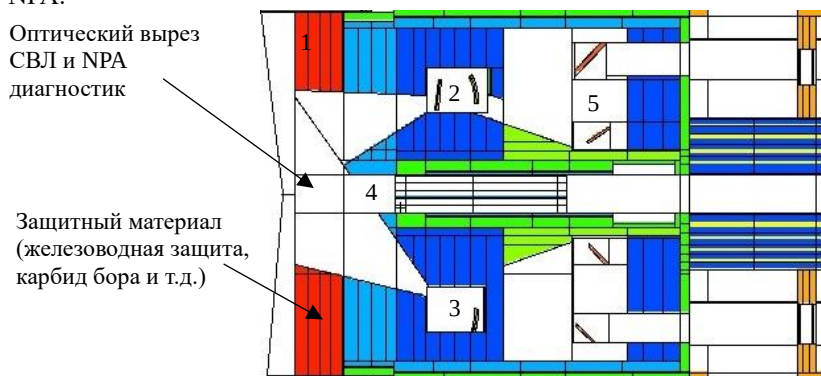


Рисунок 6 - Вертикальное сечение расчетной модели ЭП11: 1 – ДПС, 2 – Верхний УВЗ, 3 – Нижний УВЗ, 4 – Коллиматор NPA, 5 – Верхний УПЗ

На рис.6 видно, что большую часть защиты перед коллиматором НРА диагностики, выполненным из вольфрама, срезает оптический вырез от нижнего УВЗ СВЛ диагностики. Проведены нейтронно-физические расчеты со смещением положения именно нижнего УВЗ СВЛ диагностики и НРА коллиматора.

Показано, что взаимное смещение коллиматора НРА и нижнего УВЗ диагностики СВЛ относительно их номинального положения приводит к незначительному увеличению плотности потока нейтронов за герметизирующей плитой.

В связи высокими радиационными нагрузками в ЭП11, где расположены системы СВЛ и НРА, была изменена компоновка защиты во вентуривакуумной области. Выполнено обновление дизайна защитной конструкции экваториального порта - добавлены вставки из В4С (карбид бора) в пустые области и заполнены пространства, предотвращающие сквозной пролет частиц между ДЗМ.

В результате изменения конструкции радиационной защиты в экваториальном порту №11, удалось снизить потоки нейтронов и гамма-квантов на 30 % по сравнению с результатами, полученными ранее для предыдущего варианта конструкции.

Предварительные расчеты показали необходимость снижения тепловых нагрузок вблизи первой стенки, где располагаются диагностические системы. Коллиматор НРА диагностики смещался вглубь порта и оценивалось, влияние его нового положения на распределение нейтронных потоков за герметизирующей плитой и в области размещения СВЛ диагностики. При смещении вольфрамового коллиматора вглубь ДЗМ#2 ЭП11, плотность потока нейтронов в зеркалах №3,4 УПЗ увеличивается не более чем на 10 %, что несущественно. При этом нагрузки на коллиматор были снижены в два раза.

Для оценки парциального вклада от технологических вырезов (для оптических путей и диагностического оборудования) в защите на нейтронный поток, каждый ДЗМ поочередно заполнялся защитным материалом (карбидом бора) и оценивались изменения в нейтронном потоке в зоне за герметизирующей плитой.

Защитные блоки в ДЗМ#1 существенно снижают нейтронный поток за герметизирующей плитой (на 40 %). С закрыванием каналов LFSR (Low Field Side Reflectometry) диагностики защитным материалом, нейтронный поток снижается более чем на 45 %. Основной вклад в нейтронную обстановку за герметизирующей плитой вносит защитная конструкция ДЗМ#1, в котором неблагоприятно сочетаются большие объемы пустот с многочисленными вырезами для диагностики LFSR.

Рассмотрены варианты моделирования, когда оптические вырезы СВЛ диагностики в ДЗМ#2 заполнялись защитным материалом (НРА канал открыт и смещен на 200 мм вглубь ДЗМ#2). Результаты моделирования свидетельствуют о незначительном влиянии оптических вырезов диагностики СВЛ на нейтронную обстановку за герметизирующей плитой. При полном закрытии вырезов диагностики СВЛ плотность потока нейтронов падает на 10 %, что говорит о качественной компоновке защиты в ДЗМ#2.

В ДЗМ#3 добавлялись блоки защитного материала из карбида бора в места, где не было защиты. Поставленные защитные блоки, заметно (до 10 %) снижают нейтронный поток за герметизирующей плитой. Расчёты показали, что заполнение каналов диагностик защитным материалом в ДЗМ#3 слабо, всего на 6 %, снижают нейтронный поток за герметизирующей плитой.

Как отмечалось выше, диагностика СВЛ является одной из важнейших систем для работоспособности ИТЭР, ключевые элементы которой (оптические зеркала и конструкция УВЗ) располагаются сразу за ДПС и будут подвержена критическим нагрузкам от 14 МэВ нейтронов из плазмы. В ходе магнитного удержания плазменного шнура изменяется положение его центра – Шафрановский сдвиг, что приводит к перераспределению радиационных нагрузок на элементы конструкции токамака (вакуумная камера, ДПС, диагностическое оборудование). Шафрановский сдвиг плазмы внутривакуумной камеры Δ (величина сдвига магнитной поверхности) можно получить, интегрируя двумерное уравнения Грэда - Шафранова:

$$\frac{d\Delta}{dr} = -\frac{1}{R \cdot B_{\theta}^2} \left(\frac{r^3}{a^2} \cdot \beta \cdot B_{\theta a}^2 + \frac{1}{r} \int_0^r B_{\theta}^2 \cdot r \cdot dr \right) \quad (1)$$

В работе рассмотрены изменения гамма-нейтронных потоков и сна нагрузок за все время жизни диагностики при смещении центра плазмы наружу от геометрического центра вакуумной камеры на Шафрановский сдвиг, при $\beta = 1$ – отношение газового давления в плазме к магнитному:

$$\beta = \frac{\bar{p}}{p_{mag}} = \frac{p}{B^2/2\mu_0} = \frac{n \cdot k_B \cdot T}{B^2/2\mu_0} \quad (2)$$

$$\Delta \sim \frac{a^2}{4R} (\beta + 1) \sim 0,32 \text{ м} \quad (3)$$

где $\bar{p}$ – среднее газокINETическое давление плазмы, p_{mag} – магнитное давление, B – индукция магнитного поля, μ_0 – магнитная постоянная, a – малый и R – большой радиус токамака ИТЭР.

На Рисунках 7 и 8 представлено сравнение двух профилей нейтронного и гамма потоков для базового DT режима работы токамака ИТЭР на номинальной термоядерной мощности 500 МВт, при смещении центра плазменного шнура на Шафрановский сдвиг и без него.

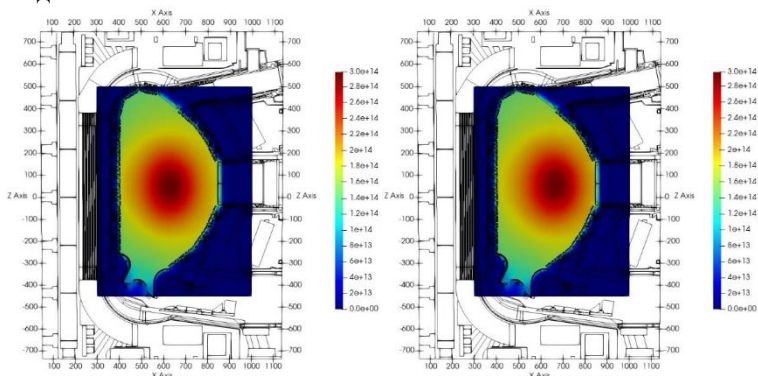


Рисунок 7 – Профиль плотности потока нейтронов, при источнике нейтронов в виде плазмы для исходного (слева) и смещенного (справа) вариантов

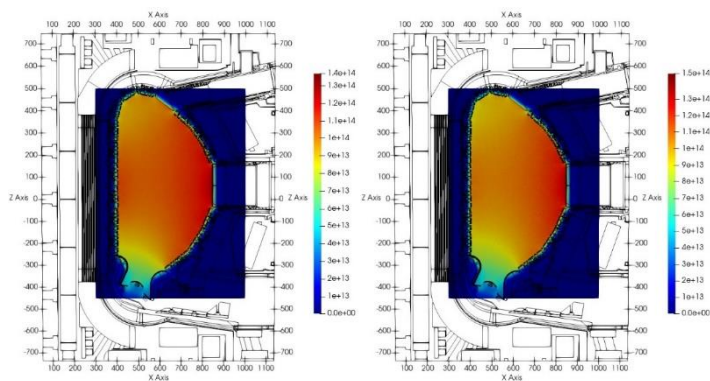


Рисунок 8 – Профиль плотности потока вторичного гамма-излучения, при источнике нейтронов в виде плазмы для исходного (слева) и смещенного (справа) вариантов

Можно отметить увеличение плотности потоков и соответствующих нагрузок на 10% в элементах диагностического оборудования, по сравнению с результатами, полученными ранее для исходного варианта расположения плазмы в вакуумной камере. Данные изменения в радиационных нагрузках не являются критическими и не повлияют на работу диагностической системы.

В экваториальном порту №12, УВЗ СВЛ диагностики находится сразу за ДПС и подвержена максимальным радиационным нагрузкам, в результате которых могут пострадать оптические зеркала из молибдена, передающие световой пучок из плазмы. В результате моделирования определена плотность потока нейтронов и сна нагрузки в районе УВЗ СВЛ диагностики в ЭП12. Эти нагрузки в единицах числа смещений на атом были рассчитаны с помощью программного комплекса FISPACT-II [18]. При этом детальная оценка потоков проводилась в ограниченной области. Для регистрации потоков была использована кубическая сетка с шагом 0,5 см.

Среднее значение плотности нейтронного потока в зоне ДПС не превышает $2 \cdot 10^{14}$ н/см²·с. Высокоэнергичные ДТ нейтроны хорошо замедляются охлаждающей водой и рассеиваются сталью в ДПС. Такой состав материалов известен своей эффективностью для построения радиационной защиты и смягчения спектра нейтронов [19]. Благодаря этому, в зоне, расположенной за ДПС, доминируют нейтроны с энергией от 0,1 до 10 МэВ.

Расчет спектров нейтронов проведен для 175 энергетических групп (от 0,1 эВ до 19,6 МэВ – спектр Vitamin-J - 175) [20]. Спектр нейтронов в зоне УВЗ весьма неоднороден и в нем наблюдается снижение плотности потока нейтронов в 2-3 раза от передней к задней стенкам корпуса УВЗ. Оно происходит на отрезке в 25-30 см, а начальный поток в ДПС снижается примерно на порядок величины.

Проведен анализ накопления радиационных повреждений кристаллических решёток используемых материалов под нейтронными нагрузками в единицах числа смещений на атом (сна) за все время жизненного цикла ИТЭР. Метод, используемый для расчёта смещений, основан на модели NRT (Norgett — Robinson — Torrens) [21], которая является стандартным для расчёта повреждений в материалах, вызванных

столкновениями с ионами или нейтронами. В макроскопической модели радиационных повреждений число смещений на атом зависит от поглощённой энергии и от энергии, необходимой для смещения атома из его положения в кристаллической решётке:

$$\text{сна} = 0,8 \frac{E_a}{2E_d} \quad (4)$$

где E_a — полная поглощённая энергия, передаваемая атомам решётки, вычисленная с помощью библиотеки микросечений FENDL; E_d — энергия, необходимая для смещения атома из его положения в кристаллической решётке; сна – число смещений на атом материала. В расчётах принимались значения $E_d = 90, 60$ и 40 эВ для вольфрама, молибдена и стали соответственно [22].

Анализируя результаты расчетов сна в элементах конструкции корпуса УВЗ, можно сделать вывод о незначительных радиационных повреждениях молибдена, как защитного материала в СВЛ-диагностике при выходе термоядерный нейтронов $\sim 2,8 \cdot 10^{27}$, за все время эксплуатации токамака ИТЭР.

Средние по толщине значения по каждой стенке защитного корпуса УВЗ не превышают 1 сна, максимальное значение выявлено на передней стенке, что вполне логично, так как она находится ближе всего к плазме и подвержена наибольшему нейтронному потоку. Локальные значения порядка 0,3 сна ожидаются в области вырезов для оптических путей. Для сравнения были проведены аналогичные расчеты, где молибден, из которого выполнен корпус УВЗ, заменялся на вольфрам и нержавеющей сталь (SS316-IG). Сталь более подвержена радиационному повреждению при нейтронном облучении. Лучше всего при моделировании показал себя вольфрам, однако нагрузки, рассчитанные для молибдена также, не приводят к разрушению его кристаллической структуры, что позволяет использовать его в качестве конструкционного материала. Расхождение результатов расчетов числа смещений в материалах, проведенных с помощью FISPACT-II, а также MCNP, составили менее 10 %.

Краткие выводы к Главе №2.

Полученные в работе результаты расчетов показали хорошее согласие теоретических и практических данных, полученных при проектировании радиационной защиты и применении оптимальных конструкционных материалов в термоядерном реакторе. Оценены радиационные нагрузки на конструкцию диагностической системы СВЛ, расположенной критически близко к плазме.

1. Выполнен поиск оптимального положения диагностических систем в ДЗМ#2 ЭП11 и показано, что взаимное смещение НРА коллиматора вглубь ДЗМ и нижнего УВЗ диагностики СВЛ в сторону плазмы относительно их исходных положений - приводит к незначительному увеличению плотности потока нейтронов за герметизирующей плитой.
2. После улучшения конструкции защиты в ЭП11, заключающейся в добавлении защитного материала из стали и карбида бора в места без защиты и изменении положения диагностических систем, плотность потока нейтронов снизилась на 30 %.

3. Наблюдаются незначительные изменения в радиационных нагрузках при смещении центра плазмы на Шафрановский сдвиг наружу от центра вакуумной камеры. Наблюдается увеличение потоков и сна не более чем на 10% по сравнению с результатами, полученными ранее для базового варианта.
4. Результаты расчетов в ЭП12 свидетельствуют о значительном градиенте потоков в зоне УВЗ с двукратным снижением нагрузок от передней к задней стенке УВЗ. Плотность потока нейтронов в зеркале М1 составляет $2,3 \cdot 10^{13}$ н/см²·с.
5. Выяснено, что передняя стенка молибденового корпуса УВЗ в ЭП12 подвержена наибольшему радиационному повреждению – в среднем 0,22 сна за весь срок службы установки. Локальный максимум достигает $\sim 0,3$ сна в небольшой области вокруг выреза для входного зрачка в передней стенке защитного корпуса УВЗ СВЛ диагностики, при флюенсе $4 \cdot 10^{20}$ см⁻².

В Главе 3 рассмотрены поля энерговыделения, формируемые нейтронным и гамма-излучением, а также характеристики переноса тепла излучением в комплексе диагностики СВЛ. Для оценки тепловых нагрузок и проверке необходимости использования водяного охлаждения корпуса УВЗ или его отдельных элементов были проведены расчеты трехмерных профилей ядерного энерговыделения от нейтронного и гамма-излучения, мощности поглощенной дозы, а также расчет температурных полей в элементах диагностической системы.

Анализ энерговыделения является важной частью оценки работоспособности конструкции диагностики, поскольку при нагреве отдельные элементы могут распухать и выводить из строя всю диагностическую систему. Поэтому необходимо обеспечить для них условия отвода тепла. Использование теплоносителя заметно усложняет дизайн диагностической системы по сравнению с вариантом естественного охлаждения за счет теплового излучения.

Для расчета радиационного энерговыделения необходимо знать радиационные поля и сечения взаимодействия различных видов излучения с материалами конструкции. Энерговыделение в конструкционных материалах определяется в основном вторичными гамма-квантами и быстрыми нейтронами. При прохождении гамма-излучения через вещество происходит ослабление интенсивности пучка гамма-квантов, что является результатом их взаимодействия с атомами вещества.

Основной вклад в энерговыделение от нейтронов вносят процессы упругого и неупругого рассеяния. В первом случае сумма кинетических энергий рассеянного нейтрона и ядра отдачи равна кинетической энергии нейтрона до взаимодействия. Полное энерговыделение получается путем сложения нагрева от нейтронов и гамма-квантов. Определялось энерговыделение в узлах конструкции экваториального порта: зеркала диагностики СВЛ (ЭП11 и 12) и переднего слоя вольфрамового коллиматора НРА (ЭП11).

При проектировании диагностической системы СВЛ необходимо определить энерговыделение во входных молибденовых зеркалах. В исходном варианте конструкции, расположение УВЗ диагностики СВЛ приводит к увеличению объема незащищенных полостей в ДПС и пенале ДЗМ, за счет конусов наблюдения. Кроме того, срезается часть защиты у диагностики НРА, зеркала размещены за охлаждаемой водой ДПС и в них существенно снижены тепловые нагрузки.

Отмечается незначительное увеличение энерговыделения во входных зеркалах

нижнего УВЗ диагностики СВЛ при его различных положениях; максимальное значение, не превышая 70 мВт/см^3 , достигается при смещении нижнего УВЗ на 10 см ближе к плазме, что также позволяет снизить энерговыделение в коллиматоре НРА на 15 % за счет уменьшения конуса наблюдения, тем самым увеличивая количество защитного материала в ДЗМ.

Для зеркал №3,4, расположенных в УПЗ СВЛ диагностики, проведено исследование для различных конструкционных материалов (Титан, Сталь и Алюминий) и выяснено, что наиболее приемлемым материалом является алюминий, энерговыделение в котором не превышает 1 мВт/см^3 .

Мощность поглощённой дозы от нейтронов и гамма-квантов практически во всем защитном корпусе УВЗ ЭП12 не превышает 3 МГр/ч , что не является критичным для молибденового защитного корпуса, за весь срок службы работы системы – $2 \cdot 10^7 \text{ с}$. Отражательная способность молибденовых зеркал практически не зависит от поглощенной дозы, более значительные повреждения наносит эрозия (деградация), при которой на отражающей поверхности происходит рост оксидной плёнки, приводящей к снижению зеркального отражения и росту диффузного рассеяния, делая невозможным их дальнейшую эксплуатацию без проведения очистки.

Теплофизический анализ, выполненный на основе расчётных значений энерговыделения в элементах системы с помощью программного обеспечения - ANSYS, свидетельствует о перепаде температур в зоне УВЗ СВЛ диагностики менее 50°C при максимальной температуре зеркала М2 - 460°C . На Рисунке 9 представлена полученная карта максимальных температур УВЗ в условиях вакуума и заданного профиля температуры ДЗМ ($80 - 250^\circ\text{C}$).

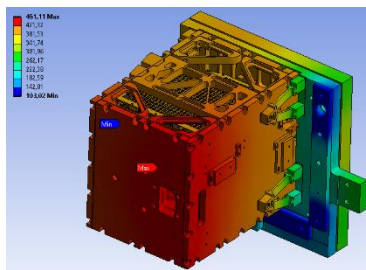


Рисунок 9 - Профиль температурного распределения в УВЗ СВЛ диагностики, $^\circ\text{C}$

Анализ показывает, что в связи с хорошей теплопроводностью молибдена, охлаждение зеркала М1 может быть обеспечен лишь одним переизлучением, без подвода воды. Тем самым будут устранены значительные усложнения конструкции при проектировании и проведение дополнительных исследований, таких, например, как – расчет аварии при потере теплоносителя. Результаты энерговыделения в наиболее нагруженных оптических элементах СВЛ диагностики легли в основу исследования деформации структурных компонентов диагностической системы [23].

Выполнение основных задач на ИТЭР планируются при различных плазменных режимах работы установки. Основным будет режим с высоким удержанием плазмы, током плазмы 15 МА, электронной температурой 25 кэВ и термоядерной DT мощностью 500 МВт (режим №2, см. табл. 1). Для определения энерговыделения в

области расположения зеркала M2 в ЭП12, было проанализировано 6 сценариев режимов работы для DT и DD плазмы, в качестве нейтронного источника, при различной термоядерной мощности и электронной температуре [3]. Ток в плазме для всех режимов постоянен – 15 МА.

Таблица 1. Различные режимы работы ИТЭР

№	Режим	Мощность, МВт	Электронная температура, кэВ
1	DT	700	30
2	DT	500	25
3	DT	300	20
4	DD	1	10
5	DD	0,5	0,1
6	DD	0,1	0,01

Самое большое значение энерговыделения ожидается на передней стенке корпуса УВЗ. Оно обусловлено достаточно близким расположением стенки к плазме и прямым попаданием высокоэнергетических частиц. При наиболее вероятном режиме работы (500 МВт термоядерной мощности DT и электронной температуре 25 кэВ) энерговыделение в зеркале M2 не достигает критических значений больше 1 Вт/см³ [24] и не требует принудительного охлаждения элементов конструкции помимо радиационного.

На Рисунке 10 в логарифмическом масштабе представлено энергетическое распределение плотности нейтронного потока, в зеркале M2 при различных плазменных режимах ИТЭР.

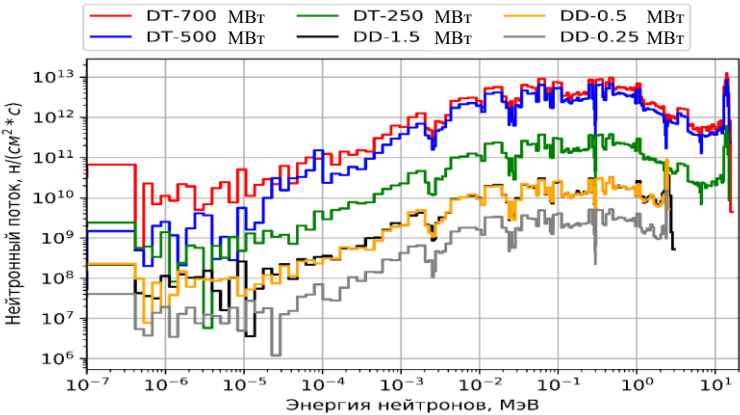


Рисунок 10 - Спектр нейтронов в молибденовом зеркале M2 УВЗ СВЛ диагностики в ЭП12 при различных плазменных режимах работы ИТЭР

На рисунке видно, что при трех DD режимах (оранжевая, черная и серая кривые) отсутствует вклад от 14 МэВ термоядерных DT нейтронов. Приведены данные спектральных характеристик необходимы для определения вклада в плотность нейтронного потока от каждой энергетической группы нейтронов и гамма-квантов, а также для оценки долговечности работы системы.

Краткие выводы к Главе №3.

Результаты проведенных исследований показали, что разрабатываемая методология комплексного анализа детализированных расчетных моделей может быть применена для решения целого спектра актуальных задач в области термоядерных технологий. Одной из ключевых из них является оценка максимальных температурных нагрузок на оптические элементы диагностического оборудования ИТЭР, обусловленных термоядерными нейтронами и гамма-квантами.

1. Отмечается незначительное увеличение энерговыделения во входных зеркалах нижнего УВЗ диагностики СВЛ. Максимальное значение не превышает 70 мВт/см^3 и достигается при смещении нижнего УВЗ на 10 см ближе к плазме.
2. Смещение коллиматора на 20 см вглубь ДЗМ#2 дает двукратное уменьшение энерговыделения в нем, которое достигает значения порядка 1 Вт/см^3 в переднем 5 см слое. Смещение УВЗ в сторону плазмы уменьшает энерговыделение в коллиматоре на 15 %.
3. Максимальное энерговыделение ожидается на передней стенке корпуса УВЗ, это обусловлено достаточно близким расположением к плазме и прямым попаданием нейтронов высокой энергии. При различных плазменных режимах энерговыделение не достигает критических значений больше 1 Вт/см^3 и позволяет не использовать какое-либо охлаждение элементов конструкции СВЛ диагностики.
4. Показано, что даже при наиболее нагруженном режиме работы плазменной установки энерговыделение в зеркале M2 не будет превышать критических значений в 1 Вт/см^3 , что позволяет говорить о работоспособности оптической системы.

В заключении приведены основные результаты и сформулированы выводы диссертационной работы.

Основные выводы диссертации

- Разработаны и применены в проектировании новые современные методы моделирования радиационных полей в плазме и конструкциях токамака ИТЭР.
- Новизна состоит в комплексном подходе к анализу нейтронных и гамма-полей, обусловленных высокотемпературной термоядерной плазмой, во внутрикамерных элементах токамака, а также детальном учете геометрических и физических характеристик материалов и конструкций, что помогает существенно оптимизировать анализ условий работы диагностических систем в термоядерных установках.
- Использование высоко-детализированных геометрической и нейтронно-физической моделей ИТЭР позволило получить уточнённую картину нейтронных и гамма-полей в области размещения диагностической системы СВЛ с пространственным разрешением, превышающим достигнутое ранее при разработке других диагностических систем ИТЭР.
- Детально проанализирована радиационная обстановка в экваториальных патрубках ИТЭР с учетом параметров термоядерной плазмы ИТЭР, внутренней

компоновки диагностических систем, характеристик конструкционных материалов и теплоносителя.

- Сделаны оценки радиационных повреждений за время жизненного цикла в составе ИТЭР и даны рекомендации по использованию материалов и защите конструкций в диагностических системах.
- Впервые рассчитаны температурные поля, формируемые нейтронным и гамма-излучением, в элементах конструкции экваториальных портов ИТЭР, с учетом детальной геометрии, охлаждаемых как тепловым излучением, так и водяным теплоносителем. Показано, что тепловое излучение достаточно для охлаждения конструкционных элементов диагностики СВЛ.
- Результаты диссертации легли в основу разработки финального варианта конструкции диагностической системы СВЛ, принятой для токамака ИТЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) R. Aymar, The ITER design / Barabaschi P., Shimomura Y. // Plasma Phys. Control. Fusion, 2002, vol. 44, p. 519—565.
- 2) К.Ю. Вуколов, Особенности применения волоконной оптики в ИТЭР / Е.Н. Андрееenko, Р.С. Афанасенко, А.А. Борисов, А.А. Морозов // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2017. – Т. 3. Вып.3.
- 3) A. Polevoi, Assessment of operational space for long-pulse scenarios in ITER / Alberto Loarte, Nariyuki Hayashi // Nuclear Fusion 55(6):063019, June 2015, DOI: 10.1088/0029-5515/55/6/063019.
- 4) С.В. Шелудяков, Нейтронно-физический анализ Н-альфа и CXRS диагностических систем в реакторе ИТЭР / К.Ю. Вуколов, Г.Е. Шаталов // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 1, с. 26—40.
- 5) A. Serikov, Mitigation of radiation streaming inside the ITER ports / U. Fischer, M. Henderson, D. Leichtle, C.S. Pitcher, et al. // ICRS – 12 & RPSD – 2-12 Conference, September 2-7, Nara, Japan, Progress in Nuclear Science and Technology (2012).
- 6) R. Juárez, ITER plasma source and building modelling to produce radiation maps / J.P. Catalan et al. // Nuclear Fusion, Volume 58, Number 12, 2018.
- 7) В.В. Коробейников, Универсальный алгоритм метода Монте-Карло для расчета бланкетов электроядерных установок // Ядерная энергетика. Известия ВУЗов. – 1999. – Вып. 2.
- 8) 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.
- 9) С.К. Жданов, Основы физических процессов в плазме и плазменных установках / В.А. Курнаев, М.К. Романовский, И.В. Цветков; под ред. В.А. Курнаева. М.: МИФИ, 2007. 368 с.
- 10) А. П. Жилинский, Диагностика плазмы / Б. В. Кутеев // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2016); <https://bigenc.ru/physics/text/1954114>.
- 11) В.Д. Шафранов, Равновесие плазмы в магнитном поле // В кн.: Вопросы теории плазмы. М., Госатомиздат. 1963. Вып. 2, с. 92-131.
- 12) J. Wesson, Tokamaks, 3rd ed. Oxford: Clarendon Press, 2004.

- 13) D. Leichtle, The ITER tokamak neutronics reference model C-Model / B. Colling, M. Fabbri, R. Juarez, M. Loughlin, R. Pampin, E. Polunovskiy, A. Serikov, A. Turner, L. Bertalot // *Fusion Engineering and Design* Volume 136, Part A, November 2018, Pages 742-746, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.04.002>.
- 14) А.С. Наволоцкий, Нейтронный коллиматор для диагностической системы атомных анализаторов токамака-реактора ИТЭР / В.И. Афанасьев, А.Д. Мельник, М.И. Миронов, В.Г. Несеневич, С.Я. Петров, М.П. Петров и др. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2020, т. 42, вып. 2. DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-38-48.
- 15) R. Forrest, FENDL-3 Library Summary documentation / R. Capote, N. Otsuka, T. Kawano, A. Koning, S. Kunieda, J.-C. Sublet, Y. Watanabe // *INDC (NDS)-0628*, Dec. 2012.
- 16) Р.С. Афанасенко, Роль нейтронных расчетов в разработке оптических диагностик ИТЭР / К.Ю. Вуколов, А.А. Морозов, Д.К. Вуколов. // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2021, т. 45, вып. 2.
- 17) Р.С. Афанасенко, Радиационные нагрузки на узел входного зеркала диагностики СВЛ в экваториальном порту ИТЭР № 12 / А.Г. Алексеев, Б.В. Кутеев, А.А. Морозов, Д.К. Вуколов // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*. – 2020. – Т. 43. Вып. 1.
- 18) J.-Ch. Sublet, J. W. Eastwood, and J. G. Morgan, “The FISPACT-II User Manual,” *Tech. Rep. CCFE-R (11) 11 Issue 6*, CCFE, 2014.
- 19) M.Z. Youssef, R. Feder, Summary of the up-to-date 3-D nuclear analysis of ITER diagnostics generic equatorial port plug (GEPP) performed with the Attila design code, *Fusion Science and Technology* 64 (3) (2013) 571-578.
- 20) E. Sartori, GROUPSTRUCTURES, VITAMIN-J, XMAS, ECCO-33, ECCO2000 Standard Group Structures. Organization for Economic Co-Operation and Development / G.C. Panini // *Nuclear Energy Agency - OECD/NEA, Le Seine Saint-Germain, 12 boulevard des Iles, F-92130 Issy-les-Moulineaux (France)*.
- 21) M.J. Norgett et al., Method of calculating displacement dose rates, *NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN* 33 (1975) 50-34.
- 22) G.S. Was, *Fundamentals of Radiation Materials Science Metals and Alloys*, 2017, DOI: 10.1007/978-1-4939-3438-6.
- 23) Ю.В. Капустин, Исследование деградации молибденовых зеркал при моделировании разгерметизации системы водяного охлаждения в ИТЭР / А.В. Рогов // *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2019, т. 42, вып. 1. DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-57-65.
- 24) A. Lopes, R. Luis, Neutronics analysis of the ITER Collective Thomson Scattering system, *Fusion Engineering and Design*, September 2018, Pages 22-28, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.06.008>.